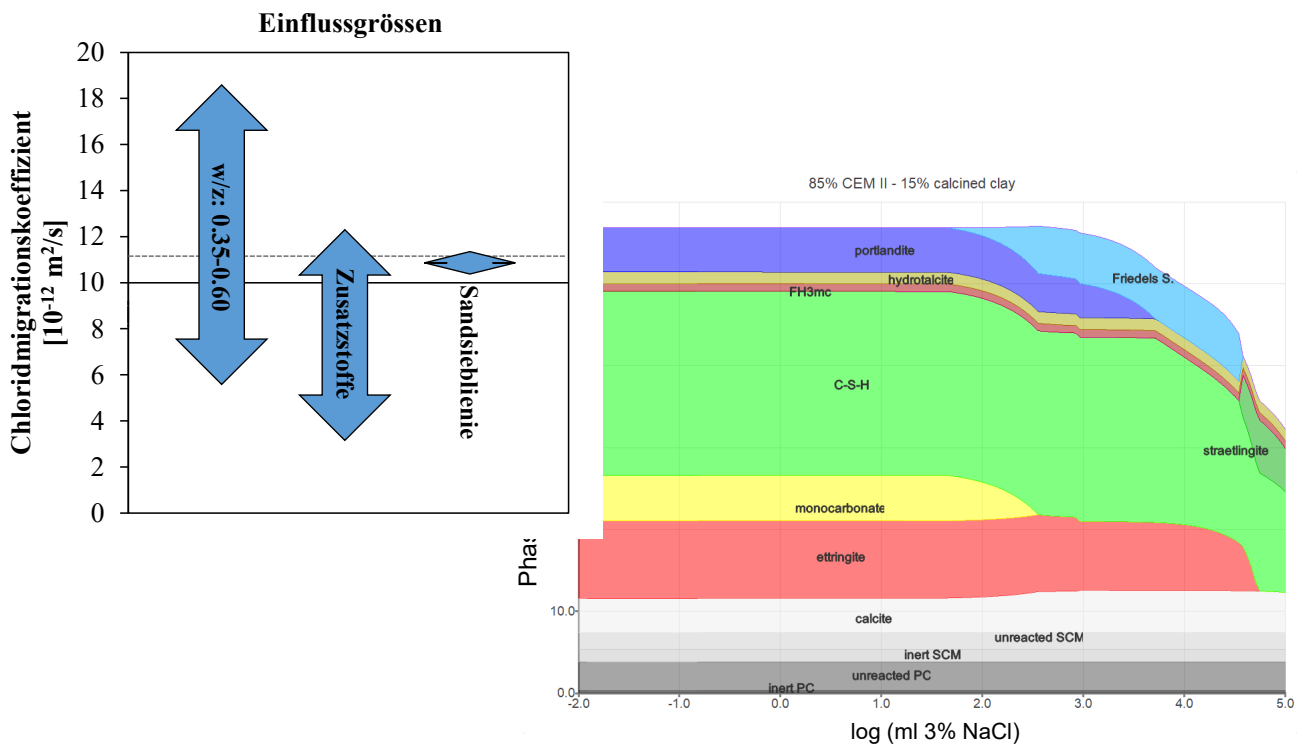




## cemsuisse-Projekt 221013

# Chloridwiderstand im Beton – Zusammenhänge und Lösungsansätze





# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>5</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>6</b>
<b>2. Projektziele</b> .....	<b>6</b>
<b>3. Vorgehen</b> .....	<b>7</b>
<b>4. Materialien</b> .....	<b>8</b>
4.1 Ausgangsmaterialien .....	8
4.2 Betone.....	9
<b>5. Methoden</b> .....	<b>11</b>
5.1 Prüfungen an den hergestellten Betonen .....	11
5.2 Quantifizierung Rohmaterialien und thermodynamische Modellierung.....	12
<b>6. Korrosion verursacht durch Chloride im passivierten Milieu</b> .....	<b>14</b>
6.1 Grundlagen .....	14
6.2 Korrosion infolge Karbonatisierung ohne Chloride .....	14
6.3 Korrosion verursacht durch Chloride in karbonatisiertem Beton.....	15
6.4 Korrosion verursacht durch Chloride in nicht karbonatisiertem Beton.....	15
6.5 Beurteilung des Korrosionsrisikos aufgrund der verschiedenen Korrosionsarten .....	15
6.6 Ansatz der Schweizer Normung in Bezug auf den Grenzwert für den Chloridwiderstand.....	16
<b>7. Resultate Betonversuche</b> .....	<b>18</b>
7.1 Einfluss von Zumahl- und Zusatzstoffen .....	18
7.2 Erhöhter Chloridgehalt in den Ausgangsstoffen .....	20
7.3 Einfluss einer optimierten Sandsieblinie .....	20
<b>8. Resultate der thermodynamischen Modellierung</b> .....	<b>23</b>
8.1 Allgemeines.....	23
8.2 Einfluss des Gehaltes von Alit und Belit im Klinker auf die chemische Chloridbindung .....	24
8.3 Einfluss der Zusatzstoffe auf die chemische Chloridbindung.....	25
<b>9. Diskussion</b> .....	<b>26</b>
<b>10. Problempunkte / Erkenntnisse für die Praxis</b> .....	<b>31</b>
<b>11. Literatur</b> .....	<b>32</b>
<b>Anhang</b> .....	<b>34</b>

Für das cemsuisse-Projekt 221013:

Dübendorf, Abteilung Beton & Asphalt, 29.10.2024

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'A. Leemann'. The signature is written in a cursive, flowing style.

Dr. Andreas Leemann

## Zusammenfassung

Während der letzten Jahre sind vermehrt Probleme aufgetreten, die normativen Vorgaben an den Chloridwiderstand von Tiefbaubetonen zu erreichen. Basierend auf einer Literaturrecherche und flankierenden Experimenten sind die folgenden Fragen (hier vereinfacht wiedergegeben) hinsichtlich Chloridwiderstand zu klären:

- Kann eine Bewehrungskorrosion verursacht durch Chloride im passivierten Beton stattfinden?
- Hat das Verhältnis von Alit zu Belit einen Einfluss auf den Chloridwiderstand und inwiefern wirkt sich der Chloridgehalt im Klinker auf den Chloridwiderstand im Beton aus?
- Wie wirkt sich der Einsatz von Zumahlstoffen auf den Chloridwiderstand aus?
- Welchen Einfluss übt eine optimierte Sandsieblinie auf den Chloridwiderstand aus?

Chloride können im passivierten Beton eine Bewehrungskorrosion auslösen. Bei einem passivierten Beton ist die mit Korrosionsprodukten bedeckte Bewehrungsfläche bei der Präsenz von Chloriden zwar deutlich kleiner als beim karbonatisierten Beton, aber es sind im Vergleich zum karbonatisierten Beton 2-3 grössere, lokale Abtragstiefen im Bereich der Korrosionsstellen mit einer entsprechend grösseren Reduktion des Bewehrungsquerschnittes zu erwarten.

Bei einer Veränderung des Verhältnisses von Alit zu Belit im Zement bleibt die chemische Bindungskapazität für Chloride praktisch identisch. Die schnellere Hydratation bei einem erhöhten Alitgehalt und der potentiell höhere Chloridwiderstand können einfacher über die Mahlfeinheit als die Klinkerzusammensetzung gesteuert werden.

Die Zugabe von Chloriden im Frischbeton (0.1 Masse-%/Bindemittel) führt bei den untersuchten Betonen zu keiner feststellbaren Abnahme des Chloridwiderstandes.

Reaktive Zusatzstoffe verbessern den Chloridwiderstand. Allerdings kommt abhängig von der Art des Zusatzstoffes diese Wirkung im Prüfalalter von 28 Tagen unterschiedlich stark zu tragen. Während von fünf verwendeten Zusatzstoffen die Flugasche und das Glasmehl keine Verbesserung des Chloridwiderstandes bewirkten, wurde der Chloridmigrationskoeffizient bei der Verwendung von calciniertem Ton, Hydrolith und Hüttensand im Vergleich zum Referenzbeton aus CEM II/A-LL um rund den Faktor 2 verringert.

Die Optimierung der Sandsieblinie bewirkt nur geringfügige Änderungen des Chloridwiderstandes. Die Verwendung eines Sandklassierers kann aber eine wichtige Massnahme sein, um Streuungen der Betonqualität zu minimieren.

## 1. Einleitung

Seit den Sechzigerjahren werden in der Schweiz Chloridsalze vermehrt als Taumittel im Winterdienst eingesetzt. Einerseits kommt dieses Tausalz über Spritzwasser und Sprühnebel in Kontakt mit entsprechend exponierten Betonbauteilen wie Stützmauern, Ränder von Fahrbahnplatten, Brückenpfeiler oder Widerlager. Dort dringt es durch kapillares Saugen und Diffusion in den Beton ein. Andererseits kann chloridhaltiges Wasser bei fehlenden Abdichtungen oder Schwachpunkten der Abdichtung zu Brückenplatten oder der Tragkonstruktion von Brücken vordringen. Wird der kritische Chloridgehalt auf Bewehrungsniveau überschritten und ist gleichzeitig genug Feuchtigkeit vorhanden, beginnt die Bewehrungskorrosion. Dieser Vorgang ist der Hauptgrund für Schäden und reduzierte Nutzungsdauer von Stahlbetonbauten. Entsprechend wichtig ist, dass der Beton einen möglichst hohen Widerstand gegen das Eindringen von Chloriden aufweist. Aus diesem Grund wird in der Schweiz der Chloridwiderstand von Beton mit einer Exposition zu Tausalzen geprüft. Für den mit einer beschleunigten Chloridmigrationsprüfung ermittelten Chloridwiderstand ist ein Grenzwert definiert. In den letzten Jahren ist ein Trend mit einer Abnahme des geprüften Chloridwiderstandes der Tiefbaubetone zu beobachten. Entsprechend bekunden viele Betonhersteller Schwierigkeiten, den geforderten Chloridwiderstand in ihren Tiefbaubetonen zu erreichen. Ein Grund für diese Situation ist die CO<sub>2</sub>-Problematik, die dazu geführt hat, dass die früher dominierenden CEM I - Zemente durch Kompositzemente mit reduzierten Klinkeranteil abgelöst wurden. Zudem wurde 2010 der normativ vorgeschriebene Zementgehalt für den bei Chlorid-Exposition hauptsächlich verwendeten Beton Typ G von 340 auf 320 kg/m<sup>3</sup> reduziert. Des Weiteren wird es seit einigen Jahren von der SN EN 206 erlaubt, für die Berechnung des Wasser-Zement-Wertes (w/z) die Wasseraufnahme der Gesteinskörnung vom Gesamtwasser zu subtrahieren. Entsprechend ist es möglich, bei gleichem Zementgehalt mit höheren Wassergehalten im Beton zu arbeiten.

## 2. Projektziele

Ziel der Arbeit ist es, die Zusammenhänge besser zu kennen, die den Chloridwiderstand im Beton beeinflussen. Dabei geht es zum einen darum, den aktuellen Wissenstand zusammenzufassen. Zum andern soll der Einfluss von bisherigen und neuartigen Zumahl- und Zusatzstoffen identifiziert und in den Kontext des Chloridwiderstandes gestellt werden.

In erster Linie sind folgende Zusammenhänge von Interesse (Vorgabe aus der Projektausschreibung):

- Kann eine Bewehrungskorrosion verursacht durch Chloride im passivierten Beton stattfinden?
- Hat das Verhältnis von Alit zu Belit einen Einfluss auf den Chloridwiderstand und inwiefern wirkt sich der Chloridgehalt im Klinker auf den Chloridwiderstand im Beton aus. Der Einsatz von alternativen Brennstoffen führt tendenziell zu höheren Chloridwerten im Klinker.
- Wie wirkt sich der Einsatz von herkömmlichen Zumahlstoffen wie Silikastaub, Flugasche und Hüttensand sowie von neuartigen Zumahlstoffen wie kalzinierten Tonen aus? Die Umstellung der Stahlproduktion von Kohle auf Wasserstoff wird zu Hüttensanden mit geringerem Kalkanteil führen.

- Die vor allem im Mittelland für die Betonproduktion hergestellten Sande weisen im Bereich der Korngrösse zwischen ca. 0.25 – 2.0 mm einen Überanteil auf – den sogenannten „Katzenbuckel“ – der sich suboptimal auf die Packungsdichte im Beton auswirkt. In Sandaufbereitungen kommen zur Optimierung der Sande vermehrt Sandklassierer zum Einsatz. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, welchen Einfluss eine optimierte Sandsieblinie auf den Chloridwiderstand ausübt.

### 3. Vorgehen

Die durch Chloride induzierte Bewehrungskorrosion im alkalischen Milieu und damit im passivierten Beton wurde anhand von Literaturdaten abgeklärt.

Anhand von Versuchen an im Labor hergestellten Betonen wurde der Einfluss folgender Faktoren auf den Chloridwiderstand abgeklärt:

- Einfluss verschiedener Zumahl- und Zusatzstoffe
- Einfluss eines erhöhten Chloridgehaltes in den Ausgangsstoffen
- Einfluss einer optimierten Sandsieblinie

Der Einfluss verschiedener Zumahl- und Zusatzstoffe wurde abgeklärt, indem ausgehend von einer Referenzmischung jeweils 15 und 30 Masse-% des Zementes durch Zusatzstoff ersetzt wurde. Die Zugabewassermenge wurde dabei konstant gehalten und die Verarbeitbarkeit über die Anpassung des Fließmittelgehaltes gesteuert.

Um einen erhöhten Chloridgehalt in den Ausgangsstoffen zu simulieren, wurde bei ausgewählten Betonmischungen mit unterschiedlichen Zusatzstoffen NaCl mit dem Zugabewasser beigegeben, so dass der zusätzliche Chloridgehalt im Frischbeton 0.1 Masse-% des Gesamtbindemittelgehaltes betrug (= Grenzwert in EN 197-1 für Normalzemente). Von jeder der ausgewählten Betonmischung wurde auch eine Referenz ohne Chloridzugabe hergestellt.

Für die Versuche zur optimierten Sandsieblinie wurden ausgehend von einer Referenzmischung mit natürlicher Siebkurve des Empa Betriebssandes weitere Betonmischungen mit und ohne (= optimierte Sandsieblinie) Katzenbuckel in der Sandsieblinie hergestellt. Bindemittel und Wassergehalt blieben dabei konstant und die Verarbeitbarkeit wurde über die Anpassung des Fließmittelgehaltes gesteuert. Da der Wasseranspruch der Mischungen mit optimierter Sandsieblinie aufgrund des geringeren Gehaltes an Feinanteil und der optimierten Packungsdichte geringer war, wurde eine weitere Mischung mit der optimierten Sandsieblinie hergestellt, welche einen gleichem Fließmittelgehalt wie bei der Mischung mit Katzenbuckel, aber einen reduzierten Wassergehalt aufwies.

An den hergestellten Betonen wurden jeweils die Frischbetoneigenschaften sowie die Druckfestigkeit und in den meisten Fällen zusätzlich der Sauerstoffdiffusionskoeffizient bestimmt.

Mit Hilfe von thermodynamischer Modellierung wurden der Einfluss des Verhältnisses Alit/Belit sowie des teilweisen Ersatzes von Zement durch die Zusatzstoffe Hüttensand, Flugasche und calcinierter Ton auf die Phasenänderungen der Bindemittelsysteme bei Chlorideintrag berechnet. Aus diesen Daten wurde die Menge des potenziell chemisch gebundenen Chlorids berechnet. Für die thermodynamische Modellierung wurde vorgängig die chemisch-mineralogische Zusammensetzung der Bindemittelkomponenten mittels Röntgenbeugung quantifiziert.

## 4. Materialien

### 4.1 Ausgangsmaterialien

In Absprache mit der Projektbegleitgruppe wurden für das Projekt ein CEM II/A-LL und die folgenden Zusatzstoffe ausgewählt (Tab. 1 und 2). Die Lieferanten wurden ebenfalls in Absprache mit der Projektbegleitgruppe festgelegt. Bei den Angaben zu Dichte (Pyknometer), Blaine (EN 196-6) und Zusammensetzung (EN 196-2) handelt es sich um durch die Empa bestimmte Werte und nicht um Werksangaben.

Bezeichnung	Abkürzung	Lieferant	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Blaine [cm <sup>2</sup> /g]
CEM II/A-LL 42.5 N	CEM II	Jura	3.04	4'150
Calcinierter Ton	CC	Vigier	2.58	7'790
Flugasche	FA	Holcim	2.41	3'410
Hüttensand	SL	Jura	2.89	4'530
Hydrolith F200	H	Hans G. Hauri KG	2.61	5'640
Glasmehl	GM	Misapor	2.51	2'030
Nekafill 15	KM	KFN	2.72	4'970

Tabelle 1: Dichte und Blaine der verwendeten Bindemittel und Zusatzstoffe.

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	LOI	TC
	[Masse-%]													
CEM II	16.79	4.33	2.72	0.005	0.049	0.232	0.125	61.01	1.66	0.82	0.16	2.96	8.96	2.2
CC	53.46	22.03	8.11	0.017	0.144	1.01	0.299	5.72	2.78	3.08	0.39	0.85	1.95	0.55
FA	50.63	19.26	8.13	0.010	0.071	0.854	0.507	12.62	2.11	1.76	0.90	0.97	1.78	1.2
SL	36.91	11.59	0.47	<0.003	0.291	0.828	0.024	41.75	7.41	0.52	0.38	0.47	0.82	0.19
H	49.48	17.99	4.46	<0.003	0.298	0.361	0.141	8.88	0.63	4.21	7.32	0.2	5.17	0.46
GM	71.86	1.83	0.38	n.a.	n.a.	0.060	0.019	10.37	1.86	0.75	12.2	0.14	0.37	0.13
KM	<0.11	<0.11	<0.04	<0.003	<0.004	<0.019	0.048	55.42	0.52	<0.03	<0.06	0.10	43.7	13.3

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung der verschiedenen Bindemittel und Zusatzstoffe. LOI = Glühverlust, TC = Gesamtkohlenstoff, n.a. = nicht analysiert

## 4.2 Betone

Als Grundlage für die Betone wurde die Sorte F gemäss Tabelle NA.6 der SN EN 206 gewählt, wobei der Bindemittelgehalt bezüglich dem Mindestwert geringfügig erhöht wurde. Ausgehend von der Referenzmischung mit CEM II/A-LL als Bindemittel wurde für die Betone mit unterschiedlichen Zumahl- und Zusatzstoffen jeweils eine Menge von 15 und 30 Masse-% des Zementes ersetzt (Ausnahme Glasmehl: nur 15% Ersatz). Der Wassergehalt blieb konstant und die Verarbeitbarkeit wurde über den Fließmittelgehalt gesteuert (Tab. 3).

Die Zusammensetzung der Betone mit unterschiedlichen Zusatzstoffen und Zusatzstoffgehalten kann der Tab. 3 entnommen werden. Als Gesteinskörnung wurde gut gerundetes Alluvialmaterial verwendet, wobei der Sand 0 – 4 mm aus Gebenstorf und die Kiesfraktionen 4 – 32 mm aus Weiach stammten. Die Gesteinskörnung bestand aus folgenden Gesteinsarten (in mengenmässig abnehmender Reihenfolge): dichte Sandsteine, Dolomite, Kieselkalke, sandige Kalke, Quarzite und Gneise. Erfahrungsgemäss kann für die verwendete, luftgetrocknete Gesteinskörnung davon ausgegangen werden, dass die Hälfte der nach EN 1097-6 bestimmten Wasseraufnahme der Gesteinskörnung (im vorliegenden Fall 1.0 Masse-%) im Betonmischer wieder aufgenommen wird. Die Zugabewassermenge wurde entsprechend um diesen Wasseranteil erhöht. Es wurde ein Fließmittel auf Polycarboxylat-Basis verwendet. Da das verwendete Glasmehl zu Schaumbildung neigt, wurde für diese Betonmischung ein Entschäumer auf Basis von Polyol eingesetzt.

Um den Einfluss eines erhöhten Chloridgehaltes in den Ausgangsstoffen zu simulieren, wurden die Betone Ref, CC15 und FA15 erneut hergestellt. Einziger Unterschied im Vergleich zur Mischungszusammensetzung gemäss Tab. 3 war die Zugabe von 0.1 Masse-%/Bindemittel Chlorid in Form von NaCl. Das NaCl wurde vorgängig in einem Liter Wasser aufgelöst und mit dem Zugabewasser beigegeben. Die entsprechenden Mischungen sind mit **Ref\_Cl**, **CC15\_Cl** und **FA15\_Cl** bezeichnet.

Betonbezeichnung	-	Ref	CC15	CC30	FA15	FA30	SL15	SL30	H15	H30	GM15
Gehalt CEM II	[kg/m <sup>3</sup> ]	330	281	231	281	231	281	231	281	231	281
Zusatzstoff	[-]	-	CC	CC	FA	FA	SL	SL	H	H	GM
Zusatzstoffgehalt	[kg/m <sup>3</sup> ]	-	49	99	49	99	49	99	49	99	49
Zugabewasser	[kg/m <sup>3</sup> ]	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156
Fließmittel	[%]	0.9	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5	0.3	0.5	0.6	0.5
Entschäumer	[%]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.4
Sand 0 – 1 mm	[kg/m <sup>3</sup> ]	401	400	398	399	397	401	401	400	399	400
Sand 1 – 4 mm	[kg/m <sup>3</sup> ]	267	267	266	266	265	267	267	267	266	267
Kies 4 – 8 mm	[kg/m <sup>3</sup> ]	306	305	304	304	302	306	305	305	304	305
Kies 8 – 16 mm	[kg/m <sup>3</sup> ]	324	324	322	323	321	325	324	324	323	324
Kies 16 – 32 mm	[kg/m <sup>3</sup> ]	611	609	607	608	605	611	611	610	608	609
w/b	[-]	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45

Tabelle 3: Zusammensetzung der Betone mit unterschiedlichen Zusatzstoffen und Zusatzstoffgehalten. Zahlen in der Betonbezeichnung = Gehalt an Zusatzstoff. Der Fließmittelgehalt ist in Masse-% pro Bindemittel angegeben.

Seitens Projektbegleitgruppe wurden für die Untersuchung des Einflusses der Packungsdichte zwei verschiedene Sandsiebkurven vorgegeben, welche in Abb. 1 mit "Sandsieblinie mit Katzenbuckel" und "Sandsieblinie optimiert" bezeichnet sind. Bei der "Sandsieblinie Empa" handelt es sich um die Zusammensetzung des für die Betone gemäss Tab. 3 verwendeten Betriebssandes. Diese weist ebenfalls einen gewissen "Katzenbuckel" auf.

Um die optimierte Sandsieblinie und diejenige mit einem Katzenbuckel nachstellen zu können, wurden folgende Fraktionen aus dem Empa-Betriebssand ausgesiebt:

- 0.00 – 0.25 mm
- 0.25 – 1.0 mm
- 1.0 – 2.0 mm
- 2.0 – 4.0 mm

Aus diesen vier Fraktionen wurden anschliessend die Sandsieblinien gemäss Abb. 1 zusammengesetzt.

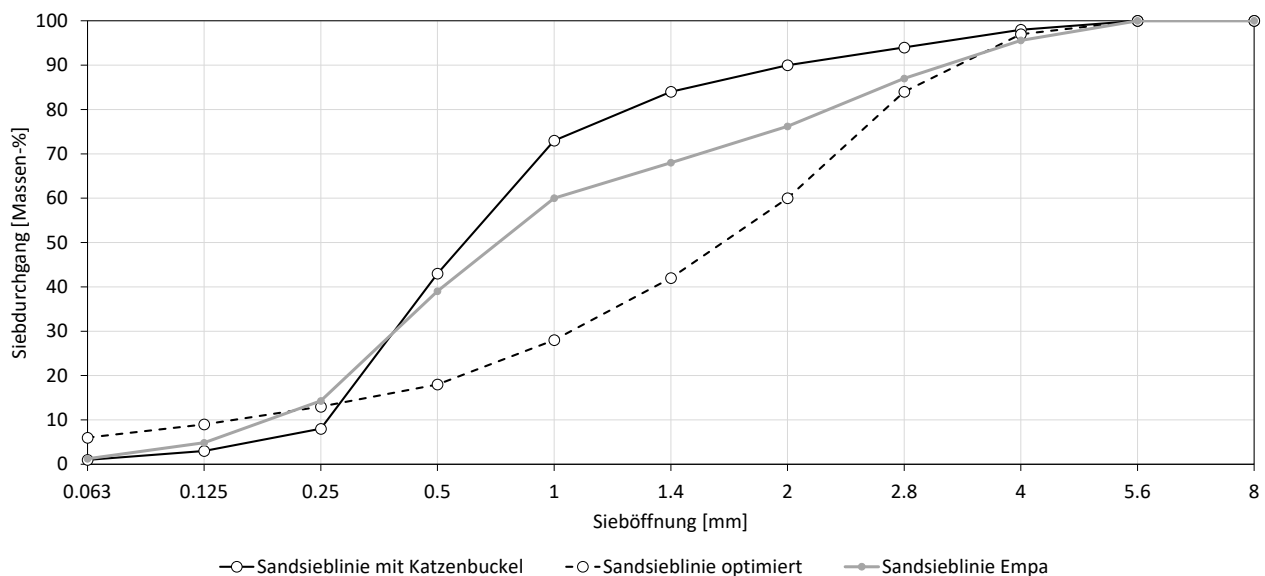


Abb. 1: Sandsieblinien zur Untersuchung des Einflusses der Packungsdichte.

Ausgehend von der Referenzmischung "Ref" wurde bei der Mischung "KB" die Sandsiebkurve so angepasst, dass sie der Sandsieblinie mit Katzenbuckel entsprach (Tab. 4). Mit Ausnahme einer geringen Reduktion des Fließmittelgehaltes wurden keine weiteren Änderungen angebracht. Bei der Mischung "OP" wurde die optimierte Sandsieblinie verwendet, welche aus den vier ausgesiebten Fraktionen zusammengesetzt wurde. Der **fehlende Anteil im Feinstbereich** wurde hierbei bewusst noch **nicht aufgefüllt**. Der Zementgehalt und der Wassergehalt blieben konstant, während der Fließmittelgehalt aufgrund des geringeren Wasseranspruches reduziert werden konnte. Bei der Mischung OP2 wurden in einem nächsten Schritt die fehlenden Anteile im Feinstbereich mit einem Kalksteinmehl (Nekafill, Tab. 1) aufgefüllt, so dass die Siebkurve der "Sandsieblinie optimiert" gemäss Abb. 1 entsprach. Der Fließmittelgehalt musste dazu wieder erhöht werden. Bei "OPw" wurde wieder die optimierte Sandsieblinie ohne Zusatz von Kalksteinmehl verwendet, jedoch wurde

anstatt des Fließmittelgehaltes der Wassergehalt reduziert um eine vergleichbare Verarbeitbarkeit wie bei "OP" zu erreichen. Aufgrund des geringeren Hohlraumgehaltes der optimierten Sandsieblinie wäre zusätzlich auch eine Reduktion des Zementleimvolumens denkbar gewesen. Da frühere Untersuchungen jedoch gezeigt haben, dass dadurch keine Veränderung des Chloridwiderstandes zu erwarten ist [1], wurde darauf verzichtet.

Betonbezeichnung	-	KB	OP	OP2	OPw
CEM II/A-LL	[kg/m <sup>3</sup> ]	330	330	330	330
Zusatzstoff	[-]-	-	-	KM	-
Zusatzstoffgehalt	[kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	34	-
Zugabewasser	[kg/m <sup>3</sup> ]	156	156	156	147
Fließmittel	[%]	0.5	0.2	0.4	0.5
Sand 0 – 0.25 mm	[kg/m <sup>3</sup> ]	57	95	60	97
Sand 0.25 – 1 mm	[kg/m <sup>3</sup> ]	440	95	95	97
Sand 1 – 2 mm	[kg/m <sup>3</sup> ]	115	211	211	213
Sand 2 – 4 mm	[kg/m <sup>3</sup> ]	57	268	268	271
Kies 4 – 8 mm	[kg/m <sup>3</sup> ]	306	306	306	310
Kies 8 – 16 mm	[kg/m <sup>3</sup> ]	324	324	324	329
Kies 16 – 32 mm	[kg/m <sup>3</sup> ]	611	611	611	620
w/b	[-]	0.45	0.45	0.45	0.42

Tabelle 4: Zusammensetzung der Betone mit unterschiedlichen Sandsieblinien. Der Fließmittelgehalt ist in Masse-% pro Bindemittel angegeben. KB = Katzenbuckel, OP = optimierte Sieblinie, OP2 = optimierte Sieblinie mit Kalksteinmehl, OPw = optimierte Sieblinie mit w/z-Reduktion.

## 5. Methoden

### 5.1 Prüfungen an den hergestellten Betonen

Im Rahmen der Frischbetonkontrolle wurden folgende Prüfungen durchgeführt:

- Ausbreitmass nach SN EN 12350-5
- Rohdichte nach SN EN 12350-6
- Luftgehalt nach SN EN 12350-7

Auf die Bestimmung des Wassergehaltes wurde verzichtet, da luftgetrocknete Gesteinskörnung verwendet wurde und somit die notwendige Zugabewassermenge genau bekannt und immer konstant war.

Die Druckfestigkeit wurde nach SN EN 12390-3 an Würfeln mit 150 mm Kantenlänge im Alter von 2 Tagen (1 Würfel) und 28 Tagen (3 Würfel) ermittelt.

Der Chloridwiderstand wurde nach der Norm SIA 262/1, Anhang B bestimmt. Dazu wurden aus jeweils einem Würfel Bohrkerne mit Durchmesser 50 mm durch eine seitliche Schallfläche entnommen und daraus eine Serie von 5 Proben mit Durchmesser = Höhe = 50 mm geschnitten.

Der Sauerstoffdiffusionskoeffizient wurde nach einem eigenen Verfahren gemäss Empa-SOP 5036 ermittelt. Dazu wurden aus zwei Würfeln im Alter von ca. 28 Tagen je ein Bohrkern mit Durchmesser 100 mm entnommen und daraus insgesamt vier Proben mit Durchmesser = 100 mm und Höhe = 50 mm geschnitten. Diese wurden ab einem Alter von 28 Tagen zuerst für 7 Tage bei 20°C / 35% r.F. und anschliessend für weitere 7 Tage bei 50°C im Ofen getrocknet. Nach dem Abkühlen im Exsikkator wurde die eigentliche Prüfung durchgeführt.

Die Prüfung erfolgte gemäss Beschrieb in [2-4]. Für diese Prüfung werden die Prüfkörper in eine Prüfzelle gegeben. Durch Belastung der oberen Abdeckplatte wird diese auf einen den Prüfkörper umgebenden Silikonring gedrückt, welcher sich seitlich ausdehnt und somit die Probe in der Zelle abdichtet. Die Probe selber wird dabei nicht vertikal belastet. Anschliessend wird auf beiden Seiten des Prüfkörpers ein Gasstrom aufgebracht, wobei es sich auf der Oberseite um Sauerstoff und auf der Unterseite um Stickstoff handelt. Der Gasdruck ist auf beiden Prüfkörperseiten identisch. Der Stickstoff wird nach dem Durchströmen der Prüfzelle in ein Sauerstoffanalyse-Gerät eingeleitet und der Gehalt an Sauerstoff im Stickstoff bestimmt. Aus der konstanten Sauerstoffkonzentration im Stickstoff (erreicht nach ca. einer Stunde Wartezeit), dem Grundgehalt an Sauerstoff im Stickstoff, den Gasdurchflussraten und der Prüfkörpergeometrie kann anschliessend der Sauerstoffdiffusionskoeffizient  $D_0$  berechnet werden.  $D_0$  ist umso grösser, je grösser die Diffusivität der Probe ist.

## **5.2 Quantifizierung Rohmaterialien und thermodynamische Modellierung**

Die Bestimmung des Glühverlustes und die chemische Analyse mittels Röntgenfluoreszenzanalyse erfolgten nach EN 196-2. Der Gesamtkohlenstoffgehalt wurde verbrennungsanalytisch nach ISO 10694 bestimmt.

Der mineralogische Phasenbestand (nur CEM II, Hüttensand, Flugasche, Hydrolith und calcinierter Ton) wurde mittels quantitativer Röntgendiffraktion (QXRD) mit anschliessender Rietveld-Verfeinerung der Messdaten quantifiziert. Etwa 4 g je Probe wurden in einer McCrone Micronizing Mill für 30 min in ca. 10 ml Isopropanol nass vermahlen. Die Röntgenbeugung erfolgte mittels eines PANalytical X'Pert Pro MPD Diffraktometers unter Verwendung von  $\text{CoK}\alpha$ -Strahlung, einer Divergenzblende von 0.5°, eines rotierenden Probenhalters und eines ortsempfindlichen Detektors (X'Celerator). Die Rietveld-Verfeinerung erfolgte mittels der X'Pert High Score Plus Software (Version 4.9). Für die Quantifizierung wurden die in [5] empfohlenen Einkristallstrukturen verwendet. Die Strukturen weiterer Phasen wurden aus der ICSD-Datenbank (<https://icsd.fiz-karlsruhe.de/>) entnommen. Die Bestimmung des amorphen Anteils von Hüttensand, Flugasche und calciniertem Ton erfolgte nach der G-Faktor-Methode [6, 7] mit  $\text{CaF}_2$  als externem Standard.

Zur Berechnung der Phasenzusammensetzung der hydratisierten Pasten unter Einwirkung von Chloriden mittels thermodynamischer Modellierung wurde die geochemische Modellierungssoftware GEMS-PSI 3.9.3 [8, 9] zusammen mit der Nagra/PSI-Datenbank [10] und der zementspezifischen

CEM DATA 18.1-Datenbank [11] verwendet. Für die Calciumsilicathydrate wurde das CSHQ-Model [12] verwendet. Als eisenhaltige Hydratphase wurde  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  angenommen, welches sich bei frühen Hydratationszeiten bevorzugt statt Fe-haltigem Hydrogranat bildet [13]. Eine Bindung des Chlorids am C-S-H [14] wurde nicht berücksichtigt, da hierzu die thermodynamischen Daten fehlen.

Die Berechnungen wurden für folgende Proben durchgeführt, jeweils  $w/b = 0.45$ :

- CEM II mit
  - experimentell bestimmtem Alit/Belit-Verhältnis
  - Ersatz von allem Belit durch Alit
  - doppeltem Belitgehalt und entsprechender Reduktion des Alitgehaltes
- CEM II mit
  - 15% und 30% (massebasiert) Ersatz des CEM II durch Hüttensand
  - 15% und 30% (massebasiert) Ersatz des CEM II durch Flugasche
  - 15% und 30% (massebasiert) Ersatz des CEM II durch Hydrolith
  - 15% und 30% (massebasiert) Ersatz des CEM II durch calcinierten Ton

Der Reaktionsgrad der Bindemittelkomponenten im Probenalter von 28 Tagen wurde anhand von Informationen aus der Literatur wie folgt abgeschätzt:

- Zementklinkerphasen nach Parrot & Killoh modifiziert [15]:  $\text{C}_3\text{S}$  85%,  $\text{C}_2\text{S}$  67%,  $\text{C}_3\text{A}$  85%,  $\text{C}_4\text{AF}$  73%. Für die Zusammensetzung der Klinkerphasen wurden nicht die ideale Stöchiometrie, sondern die "realen" Klinkerphasenzusammensetzungen nach Taylor [16] verwendet, bei denen der Einbau von Fremdatomen (z.B. Al in Alit und Belit) berücksichtigt wird.
- Hüttensand [17]: 40% des amorphen Anteils
- Flugasche [17]: 20% des amorphen Anteils
- Calciniertes Ton [18]: 50% des amorphen Anteils
- Hydrolith: keine Literaturdaten vorhanden; es wurde ein Reaktionsgrad von jeweils 50% für die reaktiven Phasen Natrolit, Gonnardit und Thomsonit angenommen.

Die durchschnittliche Zusammensetzung der amorphen Anteile von Hüttensand, Flugasche und calciniertem Ton wurde anhand der XRF- und QXRD-Daten abgeschätzt.

Die hydratisierten Pasten (Annahme: Probenalter 28 Tage) wurden virtuell mit zunehmenden Volumina einer 3%igen NaCl-Lösung (nach Masse) titriert, analog zu dem in [1, 19] beschriebenen Vorgehen. Eine weitere Hydratation des Bindemittels in Kontakt mit der NaCl-Lösung wurde in den Modellierungen nicht berücksichtigt. Als Resultat wird die Änderung der Phasenzusammensetzung mit zunehmender Chloridexposition erhalten. Aus diesen Daten wurde die Menge an chemisch gebundenem Chlorid in Abhängigkeit von der Chloridexposition berechnet.

Die Berechnungen wurden für eine Temperatur von 20 °C durchgeführt.

## **6. Korrosion verursacht durch Chloride im passivierten Milieu**

### **6.1 Grundlagen**

Die Korrosion von Stahl in Beton ist ein elektrochemischer Prozess, welcher ähnlich wie eine Batterie funktioniert. Daraus kann abgeleitet werden, dass vier Grundbedingungen gleichzeitig erfüllt sein müssen, damit die Stahlbewehrung im Beton korrodiert:

- Es kann eine anodische Teilreaktion (Oxidationsreaktion) ablaufen => Auflösung des Stahls
- Es kann eine kathodische Teilreaktion (Reduktionsreaktion) ablaufen
- Zwischen den Orten der beiden Reaktionen ist ein Elektrolyt vorhanden, welcher einen Ionenfluss ermöglicht (Betonporenwasser)
- Zwischen den Orten der beiden Reaktionen ist eine metallisch leitende Verbindung vorhanden, welche einen Elektronenfluss ermöglicht (zusammenhängende Bewehrung)

Normaler Baustahl, so wie er für Bewehrung im Beton verwendet wird, korrodiert an der Atmosphäre unter Vorhandensein von Sauerstoff und Wasser. Wird die Bewehrung jedoch mit Beton umhüllt, ist die Bewehrung vor Korrosion geschützt und dies selbst dann, wenn Sauerstoff und Wasser über die Porosität des Zementsteines in den Beton eindringen kann (z.B. bewitterte Flächen). Aufgrund des hohen pH-Wertes der Betonporenlösung bildet sich im Beton auf der Oberfläche der Bewehrung eine Art Schutzschicht, welche den Stahl passiviert (passiviertes Milieu) [20]. Diese verhindert, dass die anodische Teilreaktion ablaufen kann, auch wenn die übrigen drei Bedingungen erfüllt sind. Sobald die Schutzschicht zerstört wird oder sich auflöst, kann Stahl auch im Beton korrodieren.

### **6.2 Korrosion infolge Karbonatisierung ohne Chloride**

Durch die Karbonatisierung des Betons sinkt der pH-Wert der Betonporenlösung von der Oberfläche her beginnend ab. Sobald die Karbonatisierungsfront die Bewehrung erreicht, ist die Bewehrung nicht mehr passiviert und kann bei Vorhandensein von Sauerstoff und Wasser entsprechend auch im Beton korrodieren. Typischerweise wird die Bewehrung flächig depassiviert und der Korrosionsangriff umfasst den gesamten depassivierten Bereich der Bewehrung. Die anodische und die kathodische Reaktion laufen unmittelbar nebeneinander ab und man spricht von einer Mikrozellkorrosion [21]. Durch den flächigen Korrosionsangriff ist die Querschnittsabnahme der Bewehrung eher gering. Aufgrund der Volumenzunahme durch die Korrosionsprodukte entsteht jedoch ein Sprengdruck auf den Überdeckungsбетон, welcher in der Folge abplatzen kann. Sobald die Bewehrung freiliegt, beschleunigt sich die Korrosion zusätzlich. Zudem ist der Verbund der Bewehrung zum Beton nicht mehr gewährleistet.

Der Korrosion infolge Karbonatisierung wird im Wesentlichen mit einer hohen Betonüberdeckung und einem Beton mit hohem Karbonatisierungswiderstand (Prüfung nach SIA 262/1, Anhang I oder EN 12390-12) begegnet. Der Karbonatisierungswiderstand hängt hauptsächlich von der Porosität und der Pufferkapazität des Zementsteines ab [22].

### 6.3 Korrosion verursacht durch Chloride in karbonatisiertem Beton

In bereits karbonatisiertem Beton verändert sich der Korrosionsmechanismus bei Vorhandensein von Chloriden auf Bewehrungsniveau im Vergleich zum Beschrieb in Kap. 6.2 ohne Chloride nicht wesentlich (flächige Korrosion, Mikrozellbildung). Die Korrosionsgeschwindigkeit wird jedoch durch das Vorhandensein von Chloriden beschleunigt [23]. Zusätzlich kann der Chlorideintrag in karbonatisiertem Beton beschleunigt werden, da die Chloridbindekapazität der Zementhydratphasen abnimmt, resp. bereits gebundene Chloride durch die Karbonatisierung wieder freigesetzt werden [23].

### 6.4 Korrosion verursacht durch Chloride in nicht karbonatisiertem Beton

Dringen Chloride in nicht karbonatisierten Beton ein, können diese nach Erreichen eines kritischen Chloridgehaltes auf Bewehrungsniveau zu "Löchern" im Passivfilm führen (Abb. 2). In diesem Loch kann unter Vorhandensein von Sauerstoff und Wasser die anodische Teilreaktion ablaufen (Auflösung des Stahls), während auf der übrigen, noch passivierten Oberfläche der Bewehrung die kathodische Teilreaktion abläuft. Es entsteht ein sogenanntes Makroelement mit einem ungünstigen Flächenverhältnis (kleine Anode, grosse Kathode), wodurch grosse Korrosionsströme fließen und das Loch rasch in die Tiefe wachsen kann. Man spricht in diesem Fall von der chloridinduzierten Lochfrasskorrosion.

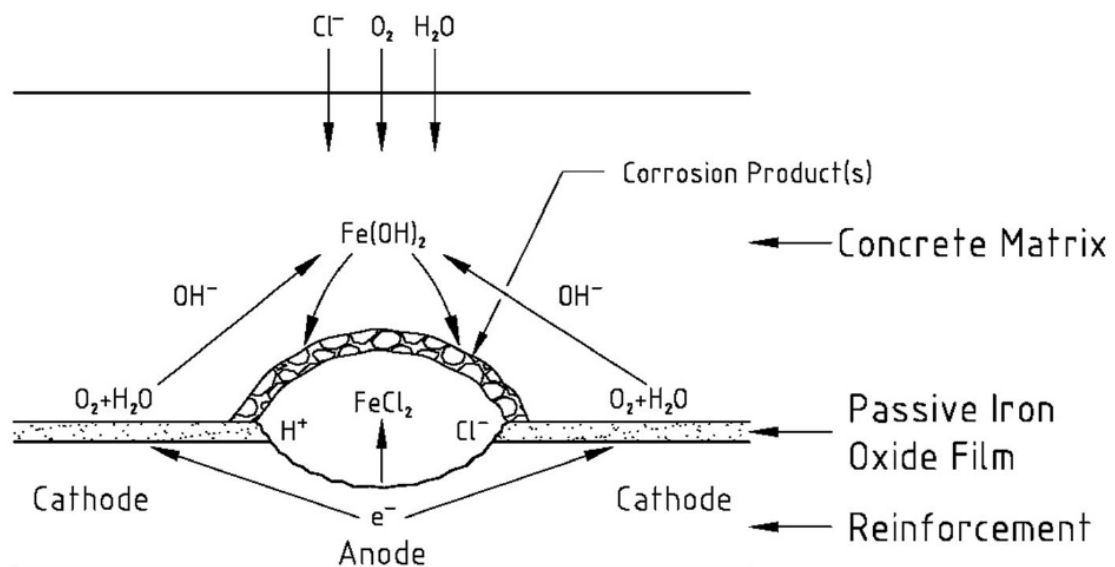


Abb. 2: Schematische Darstellung der chloridinduzierten Lochfrasskorrosion[21].

### 6.5 Beurteilung des Korrosionsrisikos aufgrund der verschiedenen Korrosionsarten

In der Literatur sind viele Studien zur Korrosion infolge Karbonatisierung sowie zur chloridinduzierten Lochfrasskorrosion zu finden. Nur in wenigen Studien wurde jedoch ein direkter Vergleich zwischen den verschiedenen Korrosionsarten durchgeführt. Das Ausmass von chloridinduzierter Korrosion in karbonatisiertem und nicht karbonatisiertem Beton wurde von Hren et al. [24] untersucht. Dazu wurden Mörtelplatten mit glatter und gerippter Bewehrung sowie mit unterschiedlichen Zementsorten hergestellt (Abb. 3). Jeweils vorkarbonatisierte und nicht

vorkarbonatisierte Proben wurden danach während 52 Wochen einer chloridhaltigen Lösung ausgesetzt.

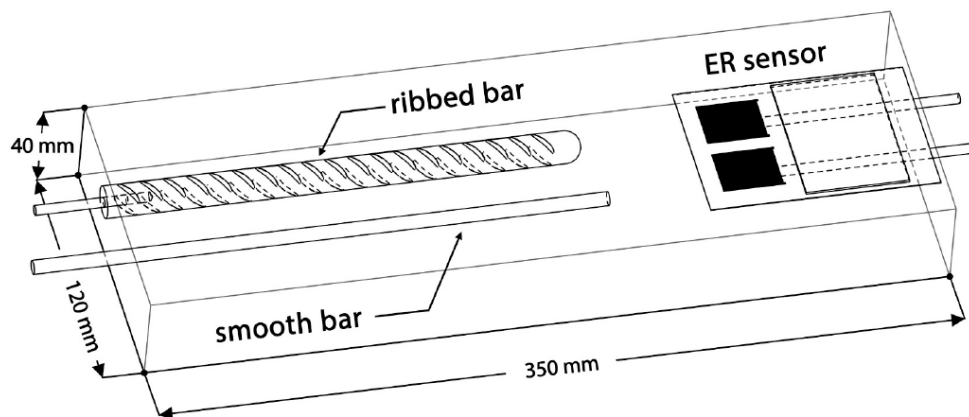


Fig. 1. Mortar specimen with an embedded Ø14 mm ribbed bar, Ø6 mm smooth bar and electrical resistance sensor, with a 10 mm mortar cover.

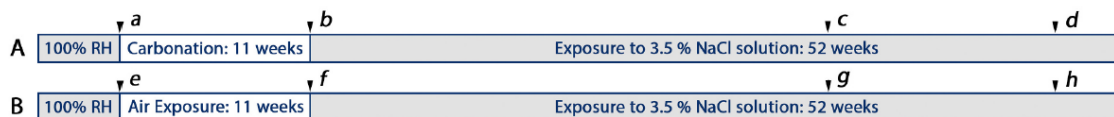


Abb. 3: Prüfkörper mit durchgeführter Konditionierung zur Untersuchung des Einflusses von chloridinduzierter Korrosion in karbonatisiertem und nicht karbonatisiertem Mörtel gemäss [24].

Die Untersuchung der Bewehrungsflächen im Anschluss an die Chloridlagerung zeigte, dass bei den nicht vorkarbonatisierten Proben die mit Korrosionsprodukten bedeckte Bewehrungsfläche zwar deutlich kleiner war, dass aber die lokale Abtragstiefe im Bereich der Korrosionsstellen bei den nicht vorkarbonatisierten Proben um den Faktor 2-3 grösser war als bei den vorkarbonatisierten Proben. Dabei war der Einfluss der verschiedenen Zementsorten (untersucht wurden CEM I, CEM II/B-M (V-LL), CEM III/B und CEM IV/A (V-P)) auf die Abtragstiefe kleiner als der Einfluss der Karbonatisierung.

Da es sich bei Bewehrungsstäben um Zugelemente handelt, haben lokale Querschnittsverminderungen einen wesentlich grösseren Einfluss auf die Tragfähigkeit als eine flächige Korrosion mit geringer Abtragstiefe. Aus diesem Grund ist eine chloridinduzierte Korrosion im passivierten Millieu üblicherweise kritischer als eine solche im karbonatisierten Beton.

## 6.6 Ansatz der Schweizer Normung in Bezug auf den Grenzwert für den Chloridwiderstand

Damit eine chloridinduzierte Lochfrasskorrosion ausgelöst werden kann, muss auf der Höhe der Bewehrungsfläche ein kritischer Chloridgehalt überschritten werden. Wie gross dieser kritische Chloridgehalt in einem spezifischen Fall ist, ist von vielen Faktoren wie z.B. pH-Wert der Porenlösung, Bewehrungspotential, Bewehrungs-Beton-Interface, Bindemitteltyp, Feuchte- und Sauerstoffgehalt des Betons, etc. abhängig und kann in sehr weiten Bereichen variieren [25, 26]. Um das Korrosionsrisiko eines **bestehenden Bauteils** effektiv abschätzen zu können, wäre die realitätsnahe Bestimmung des kritischen Chloridgehaltes für das entsprechende Bauwerk notwendig. Es sind aktuell Bemühungen im Gange, entsprechende Prüfmethode einzuführen (z.B. Merkblatt

SIA 2069: Methode zur Bestimmung des kritischen Chloridgehaltes im Beton (in Erarbeitung)). Für die Berechnung einer Restnutzungsdauer des bestehenden Bauwerks müssen zudem der effektive Chloridwiderstand des Betons, die Betonüberdeckung sowie die tatsächliche Chloridbeanspruchung bekannt sein. In diesem Fall hat der Grenzwert für den Chloridwiderstand keine Bedeutung.

In der **Planung und Ausführung eines Bauwerks** könnte ebenfalls ein objektspezifischer Chloridwiderstand definiert werden, wenn mindestens folgende Parameter bekannt wären:

- Betonüberdeckung der Bewehrung
- Kritischer, korrosionsauslösender Chloridgehalt
- Effektive Chloridbelastung des Bauteils

Für die letzten beiden Parameter sind in der Praxis üblicherweise keine verlässlichen Angaben vorhanden, und es müssten Annahmen getroffen werden. Somit wäre der daraus bestimmte, notwendige objektspezifische Chloridwiderstand des Betons ebenfalls mit grösseren Unsicherheiten behaftet.

Der in den Schweizer Normen gewählte Ansatz in Bezug auf den Chloridwiderstand sieht deshalb bei Neubauten vor, dass mit dem gewählten Grenzwert unter Einhaltung der vorgeschriebenen Betonüberdeckung sowie der normgemässen Verarbeitung und Nachbehandlung des Betons der Chloridgehalt auf Bewehrungsniveau innerhalb der vorgesehenen Nutzungsdauer so tief gehalten wird, dass die Korrosionswahrscheinlichkeit als gering eingestuft werden kann. Dabei spielt es keine Rolle, ob der Beton bis auf Bewehrungsniveau karbonatisiert ist oder nicht, da wie oben beschrieben, der nicht karbonatisierte Fall kritischer ist. Die Grundlagen für die Festlegung des Grenzwertes stammen im Wesentlichen aus den beiden ASTRA-Forschungsaufträgen [27] und [28].

## 7. Resultate Betonversuche

In der Tabelle 5 sind sämtliche, an den hergestellten Betonen erzielten Resultate zusammengefasst.

	Frischbetonkontrolle			Druck		O <sub>2</sub> -Diff	Chloridwiderstand	
	RD	LP	AM	2d	28d	D <sub>O</sub>	D <sub>Cl</sub>	Stabw
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[Vol-%]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[x10 <sup>-8</sup> m <sup>2</sup> /s]	[x10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	[x10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]
Ref	2'422	2.0	545	28.5	50.2	1.70	11.3	0.9
CC15	2'420	1.9	515	23.3	52.2	1.22	6.6	1.6
CC30	2'380	2.4	585	19.3	56.8	0.74	5.2	1.2
FA15	2'429	1.3	550	21.7	45.6	3.35	11.3	0.7
FA30	2'410	1.6	595	19.1	42.7	3.01	12.4	2.3
SL15	2'413	1.7	535	9.0*	48.8	1.60	3.2	1.2
SL30	2'405	2.3	420	12.5*	45.0	2.72	5.9	0.7
H15	2'417	2.1	480	23.1	48.6	2.36	6.7	1.1
H30	2'388	2.3	600	18.1	47.8	1.62	6.1	1.0
GM15	2'430	0.9	570	21.2	41.8	2.74	11.8	1.0
RefCl	2'435	1.5	615	30.1	53.4	1.21	12.0	1.6
CC15_Cl	2'421	1.7	470	22.3	52.4	0.99	5.0	0.6
FA15_Cl	2'426	1.6	550	24.3	47.0	1.74	10.0	2.0
KB	2'412	2.4	470	28.2	49.2	2.54	10.6	2.0
OP	2'400	2.2	430	24.2	43.0	3.26	10.3	0.9
OP2	2'409	2.0	380	22.0	42.2	-	11.5	1.7
OPw	2'441	2.1	410	31.5	56.1	1.46	8.0	1.0

Legende: RD: Rohdichte  
 LP: Luftgehalt  
 AM: Ausbreitmass  
 D<sub>O</sub>: Sauerstoffdiffusionskoeffizient  
 D<sub>Cl</sub>: Chloridmigrationskoeffizient  
 \*: Druckfestigkeit bestimmt nach 1d anstatt nach 2d

Tabelle 5: Zusammenfassung sämtlicher Prüfergebnisse von allen hergestellten Betonen.

### 7.1 Einfluss von Zumahl- und Zusatzstoffen

Sowohl die Druckfestigkeit als auch der Chloridmigrationskoeffizient D<sub>Cl</sub> streuen für die verschiedenen Betone in einem grossen Bereich, obwohl der w/b-Wert und der massenmässige Bindemittelgehalt bei allen Mischungen identisch war (Abb. 4). Dabei besteht kein deutlicher Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und D<sub>Cl</sub>. Der Einfluss der Zusatzstoffe kann sehr gross und unterschiedlich ausgeprägt sein. Ausgehend von der Referenzmischung Ref zeigen vereinzelte Zusatzstoffe einen ähnlichen Migrationskoeffizienten bei jedoch deutlich tieferer Festigkeit (FA und GM). Bei anderen Zusatzstoffen ist die Festigkeit zwar vergleichbar, D<sub>Cl</sub> jedoch deutlich kleiner (SL, H). Beim calcinierten Ton CC ist sowohl die Festigkeit höher als auch D<sub>Cl</sub> kleiner. Der Gehalt wirkt sich bei verschiedenen Zusatzstoffen unterschiedlich auf die Druckfestigkeit und D<sub>Cl</sub> aus. Während bei Flugasche und Hüttensand der höhere Gehalt zu einer tieferen Druckfestigkeit und einem höheren D<sub>Cl</sub> führt, ist es beim calcinierten Ton genau umgekehrt. Beim Hydrolith ist diesbezüglich kein Einfluss erkennbar.

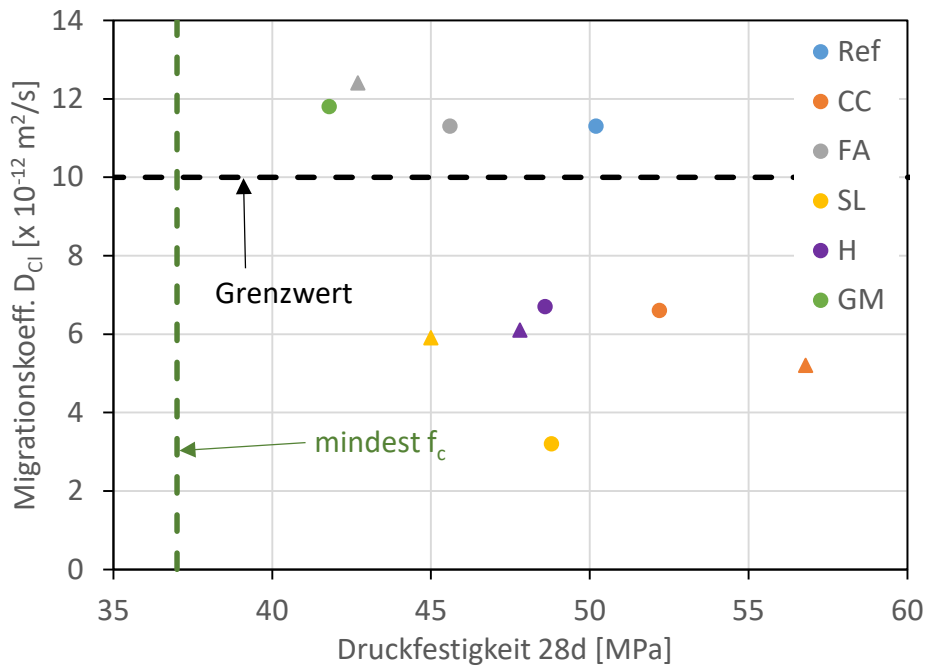


Abb. 4: Chloridmigrationskoeffizient  $D_{Cl}$  der Betone mit verschiedenen Zusatzstoffen in Funktion der Druckfestigkeit. Kreise: 15% Zusatzstoffgehalt, Dreiecke: 30% Zusatzstoffgehalt.

Wird der Sauerstoffdiffusionskoeffizient  $D_{O_2}$  als ein weiteres Mass für die Dauerhaftigkeit betrachtet, zeigt sich unabhängig von der Art des Zusatzstoffes eine wesentlich deutlichere Abhängigkeit von der Druckfestigkeit (Abb. 5). Man kann somit davon ausgehen, dass bei der Chloridwiderstandsprüfung neben der reinen Diffusivität weitere Faktoren eine massgebende Rolle spielen, welche von der Art des Zusatzstoffes abhängig sind.

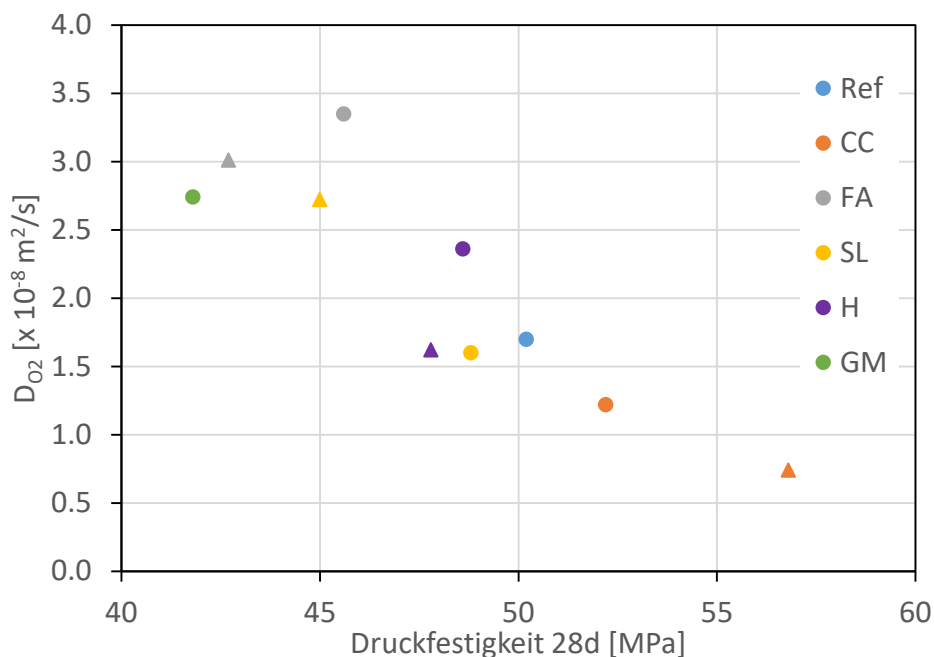


Abb. 5: Sauerstoffdiffusionskoeffizient  $D_{O_2}$  der Betone mit verschiedenen Zusatzstoffen in Funktion der Druckfestigkeit. Kreise: 15% Zusatzstoffgehalt, Dreiecke: 30% Zusatzstoffgehalt.

## 7.2 Erhöhter Chloridgehalt in den Ausgangsstoffen

Eine zusätzliche Chloridbeigabe zum Frischbeton führt im Rahmen der betrachteten Mischungen nicht zu einer systematischen Veränderung des Chloridwiderstandes (Abb. 6). Insbesondere ist keine systematische Erhöhung von  $D_{Cl}$  feststellbar.

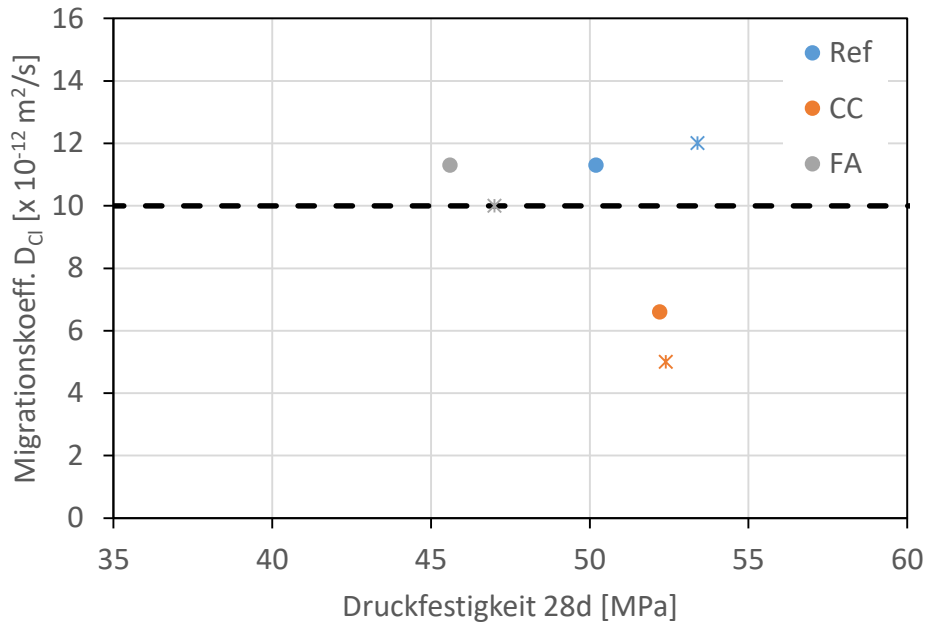


Abb. 6: Chloridmigrationskoeffizient  $D_{Cl}$  in Funktion der Druckfestigkeit für die Betone mit zusätzlicher Chloridbeigabe (Sternsymbole) im Vergleich mit den zugehörigen Referenzmischungen ohne zusätzliche Chloridbeigabe (Kreissymbole). Gestrichelte Linie: Grenzwert für den Chloridwiderstand.

## 7.3 Einfluss einer optimierten Sandsieblinie

Bei optimierter Sandsieblinie ohne zusätzlichem Feinanteil (OP) kann der Fließmittelgehalt im Vergleich zur Sieblinie mit Katzenbuckel (KB) reduziert werden und man erreicht im Mischer trotzdem ein optisch vergleichbarer Feuchtigkeitszustand. In Bezug auf die Verarbeitbarkeit hat sich dann jedoch gezeigt, dass die Betone mit optimierter Sandsieblinie bei im Mischer optisch ähnlichem Feuchtigkeitszustand wie der Beton mit Katzenbuckel-Sieblinie ein geringeres Ausbreitmass aufweisen und die groben Gesteine weniger gut im Zementleim eingebettet sind (Abb. 7). Dies ist ein Resultat des deutlich höheren Anteils an grober Gesteinskörnung im Falle der optimierten Sieblinie. Es zeigt sich somit, dass bei der optimierten Sieblinie die Steuerung der Verarbeitbarkeit schwieriger ist und eine Erhöhung des Fließmittelgehaltes einen tendenziell geringeren Effekt auf das Ausbreitmass hat.



Abb. 7: Ausbreitmass des Betons OP2.

Die aus einem Sand mit Katzenbuckel hergestellte Betonmischung (KB) weist eine ähnliche Festigkeit und einen vergleichbaren  $D_{Cl}$  auf wie die Referenzmischung (Abb. 8). Dies kann auch erwartet werden, da die Sandsieblinie der Referenzmischung relativ ähnlich ist und ebenfalls einen Katzenbuckel aufweist (vgl. Abb. 1). Bei der Mischung mit der optimierten Sandsieblinie (OP) ist der Chloridmigrationskoeffizient  $D_{Cl}$  ebenfalls ähnlich, wobei aber die Festigkeit tiefer ist. Bei optimierter Sandsieblinie und zusätzlichem Feinanteil (OP2) verändert sich die Festigkeit im Vergleich zu OP praktisch nicht und  $D_{Cl}$  ist sogar etwas höher. Bei allen vier Betonen ist der Chloridwiderstandsgrenzwert nicht erfüllt. Erst bei der Mischung mit reduziertem Wassergehalt liegt  $D_{Cl}$  unterhalb des Grenzwertes, wobei gleichzeitig auch die Festigkeit höher ist.

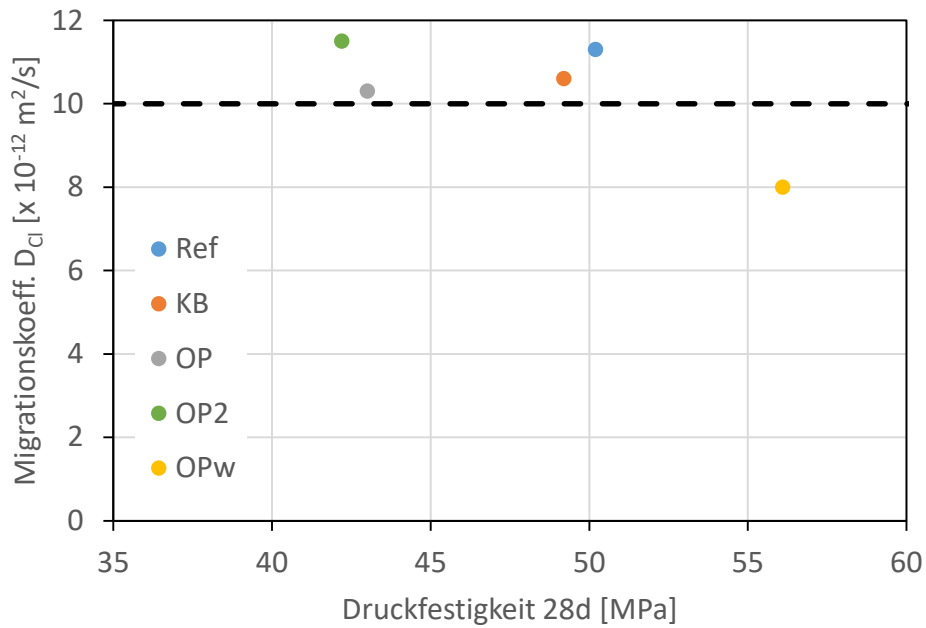


Abb. 8: Chloridmigrationskoeffizient  $D_{Cl}$  in Funktion der Druckfestigkeit für die Betone mit Variation der Sandsieblinie. Gestrichelte Linie: Grenzwert für den Chloridwiderstand.

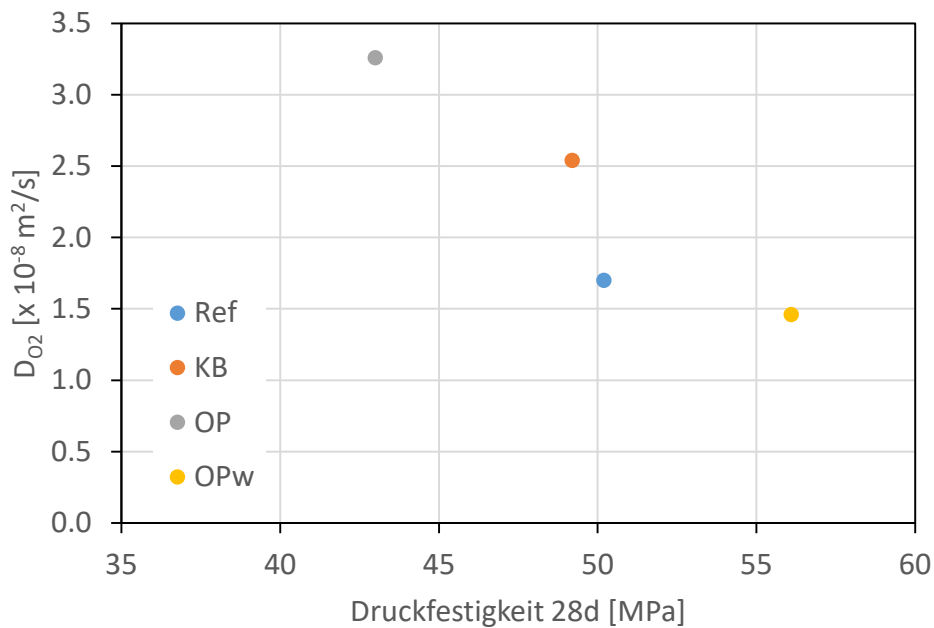


Abb. 9: Sauerstoffdiffusionskoeffizient  $D_{O_2}$  in Funktion der Druckfestigkeit für die Betone mit Variation der Sandsieblinie (OP2 nicht geprüft).

## 8. Resultate der thermodynamischen Modellierung

### 8.1 Allgemeines

Abb. 10 zeigt den berechneten Verlauf der Phasenentwicklung des hydratisierten CEM II/A-LL (28 d bei 20°C), wenn er einer zunehmenden Menge an 3%iger NaCl-Lösung ausgesetzt ist. Die linke Seite (sehr wenig NaCl-Lösung) entspricht dabei der Situation im Inneren des Betons, wo dieser noch nicht von der Chloridlösung beeinflusst ist. Die rechte Seite entspricht der Oberfläche des Betons im Kontakt mit der Chloridlösung, wo der Eintrag der Chloridionen und auch eine Auslaugung stattfindet. Die Grafik spiegelt somit die Prozesse wieder, welche beim Kontakt von NaCl-Lösung mit dem Beton von der Oberfläche in die Tiefe stattfinden, und somit quasi ein Tiefenprofil (rechte Seite Oberfläche, linke Seite Betoninneres).

Im Betoninneren zeigt der hydratisierte CEM II den typischen Phasenbestand mit Ettringit, Calciumsilicathydrat (C-S-H) und Portlandit als hauptsächliche Hydratationsprodukte. Als weitere Hydratphasen treten Monocarbonat, Hydrotalcit und Eisen(III)hydroxid auf. Calcit sowie weitere unreaktierte und inerte Bestandteile bilden den Rest des Phasenbestandes. Mit zunehmender Menge an NaCl-Lösung bildet sich zunächst die chloridhaltige Phase Friedels Salz,  $\text{Ca}_4\text{Al}_2(\text{OH})_{12}\text{Cl}_2(\text{H}_2\text{O})_4$ , auf Kosten von Monocarbonat,  $\text{Ca}_4\text{Al}_2(\text{OH})_2(\text{CO}_3)(\text{H}_2\text{O})_5$ . Ettringit ist in Anwesenheit von Chloriden dagegen stabil. Bei weiterer Erhöhung der Menge an NaCl-Lösung finden Auslaugungsprozesse statt. Zunächst wird Portlandit ausgelaugt, später findet eine Decalcifizierung des C-S-H statt. Beide Prozesse reduzieren den pH-Wert, so dass Ettringit destabilisiert wird. Das führt zur Bildung von Strätlingit,  $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ . Die Resultate der Modellierungen stimmen mit früheren Berechnungen gut überein [1, 19].

Die Modellierungen zeigen, dass der Gehalt an reaktivem Aluminium und die Verfügbarkeit von (Calcium)sulfat für die chemische Bindung von Chlorid in Form von Friedels Salz massgeblich sind. Sulfat bildet zusammen mit einem Teil des reaktiven Aluminats Ettringit. Dieser Teil des Aluminats nimmt nicht an der chemischen Chloridbildung teil, da Ettringit unter Chlorideinwirkung stabil ist. Das restliche Aluminium bildet in Gegenwart von Calcit Monocarbonat (bzw. ggf. Hemicarbonat, wenn nicht ausreichend Calcit vorhanden ist – das ist aber hier nicht der Fall) [15]. Monocarbonat (und auch Hemicarbonat) wandeln sich in Gegenwart von Chloriden zu Friedels Salz um, d.h. das Chlorid wird chemisch in dieser Phase gebunden.

Aus der Menge von Friedels Salz wurde der Gehalt an potenziell chemisch gebundenem Chlorid berechnet und für die folgenden Diskussionen in den Kapiteln 8.1 und 8.2 herangezogen. Die zugehörigen Diagramme mit den thermodynamischen Modellierungen befinden sich in Abb. A1-A5 im Anhang.

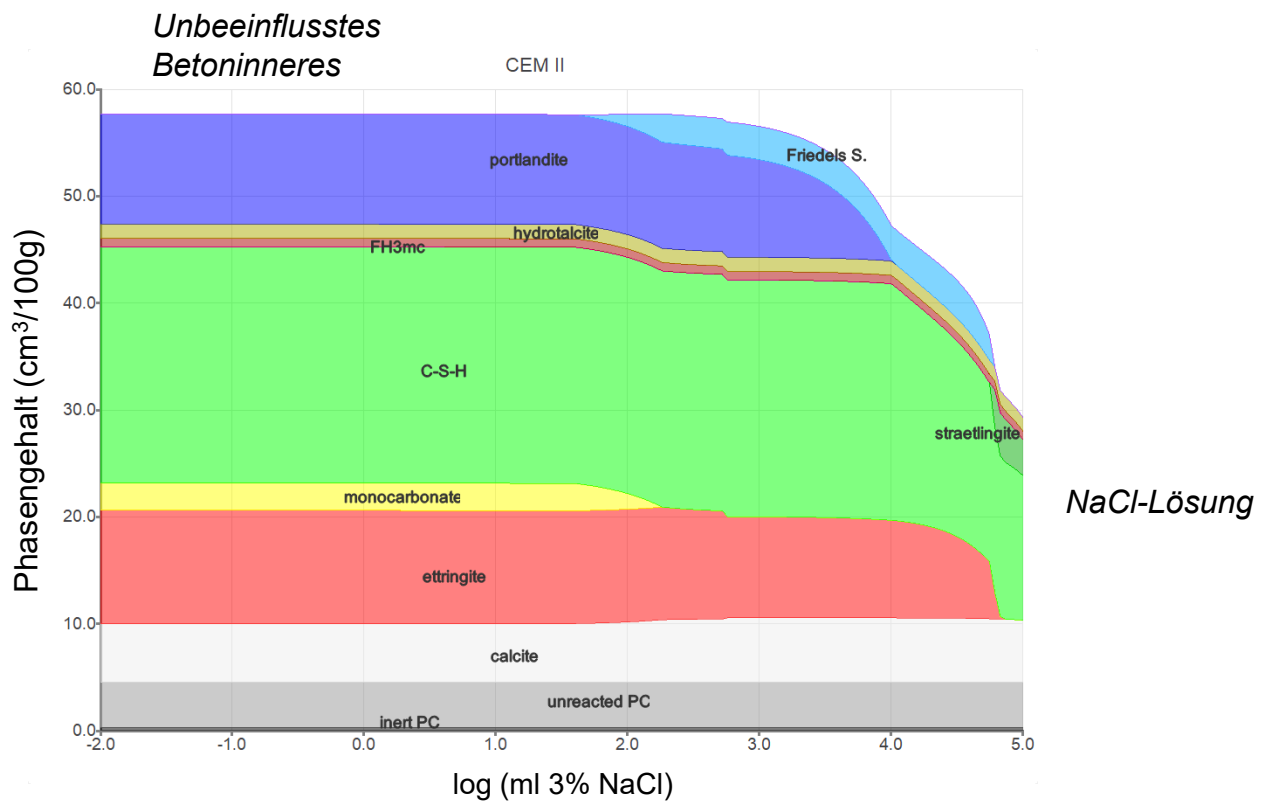


Abb. 10: Berechnete Phasenzusammensetzung des hydratisierten CEM II unter Einwirkung einer zunehmenden Menge 3%-iger NaCl-Lösung. FH3mc = mikrokristallines  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ .

## 8.2 Einfluss des Gehaltes von Alit und Belit im Klinker auf die chemische Chloridbindung

Abb. 11 zeigt die Chloridaufnahme pro 100 g unhydratisiertes Bindemittel in Abhängigkeit von der Menge NaCl-Lösung für drei verschiedene Alit/Belit-Verhältnisse. Die dazugehörigen Phasenzusammensetzungen zeigt Abb. A1. Der Effekt ist sehr gering. Dies ist auch nicht verwunderlich, da lediglich die Gehalte von Alit und Belit, nicht aber diejenigen der aluminathaltigen Phasen Tricalciumaluminat und Ferrat variiert wurden. Die leichte Zunahme der Chloridbindung mit zunehmendem Belitgehalt lässt sich dadurch erklären, dass üblicherweise in Belit mehr Aluminium eingebaut wird als in Alit [16], was bei der Modellierung berücksichtigt wurde. Das bedeutet, dass etwas mehr Aluminium für die Bildung von Friedels Salz zur Verfügung steht. In der Zementpraxis würde jedoch das Verhältnis Alit/Belit durch eine Änderung des Kalkstandards, d.h. durch eine Variierung des Gehaltes von Kalkstein im Rohmehl kontrolliert werden. In einem solchen Fall wäre keine nennenswerte Änderung der theoretischen Chloridbindung zu erwarten.

Mit dem Verhältnis von Alit/Belit lässt sich die Hydratationskinetik eines Zements beeinflussen und damit auch zu einem gewissen Grad der in einem definierten Alter bestimmte Chloridwiderstand. Allerdings ist die Mahlfineinheit eines Zementes eine deutlich einfachere und zweckmässigere Steuergröße für die Hydratationskinetik.

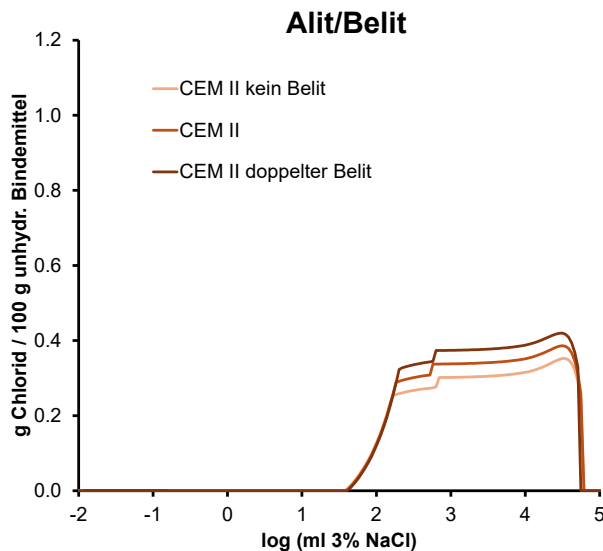


Abb. 11: Chemisch gebundenes Chlorid in Abhängigkeit vom Verhältnis Alit/Belit. Berechnet aus den Daten der thermodynamischen Modellierung.

### 8.3 Einfluss der Zusatzstoffe auf die chemische Chloridbindung

Beim Einfluss der Zusatzstoffe auf die chemische Chloridbindung spielt vor allem das durch die Zusatzstoffe eingebrachte reaktive Aluminium eine massgebliche Rolle. Das zusätzliche Aluminium bildet Monocarbonat, welches sich bei Einwirkung von Chloriden in Friedels Salz umwandelt, wie bereits in Kap. 8.1 diskutiert. Neben der Mineralogie des Zusatzstoffes spielt auch dessen Reaktionsgrad eine Rolle.

Abb. 12 zeigt die Chloridaufnahme pro 100 g unhydratisiertes Bindemittel in Abhängigkeit von der Menge NaCl-Lösung für die vier verschiedenen Zusatzstoffe. Die zugehörigen Modellierungen sind in Abb. A2-A5 im Anhang dargestellt. In allen Fällen bewirken die Zusatzstoffe mit zunehmendem Gehalt (0%, 15%, 30% Zementersatz) eine Erhöhung der Chloridbindung, da sie zusätzliches reaktives Aluminium, aber kaum zusätzliches Sulfat zur Verfügung stellen. Dies ist auch an der Zunahme von Monocarbonat bzw. der Zunahme an Friedels Salz in Abb. A2-A5 zu erkennen.

Die Zusatzstoffe lassen sich in zwei Gruppen einteilen: Hüttensand und Flugasche stellen vergleichsweise wenig reaktives Aluminium zur Verfügung. Der Hüttensand enthält zwar ca. 12 M.-%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (siehe Tab. 1), jedoch ist der Reaktionsgrad nach 28 Tagen relativ moderat (Annahme: 40%, siehe Kap. 5.2). Die Flugasche enthält zwar ca. 19 M.-%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , aber ein Teil des Aluminiums ist in der inerten Phase Mullit gebunden (siehe Tab. A1 im Anhang). Weiterhin ist der Reaktionsgrad der Flugasche sehr gering (Annahme: 20% des amorphen Anteils). Daher erhöhen Hüttensand und Flugasche die Chloridbindung in Friedels Salz nur moderat (siehe Abb. A2&A3).

Hydrolith und calcinierter Ton enthalten demgegenüber viel reaktives Aluminium. Der calcinierte Ton enthält ca. 22 M.-%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , welcher zum grossen Teil in der amorphen Phase vorliegt (Annahme: Reaktionsgrad 50%). Auch Hydrolith enthält viel reaktives Aluminium (ca. 18 M.-%), welches in reaktiven Zeolithen gebunden ist (Annahme: Reaktionsgrad 50%). In beiden Fällen wird eine starke

Zunahme von Monocarbonat bzw. nach Chlorideinwirkung von Friedels Salz beobachtet (siehe Abb. A4&A5).

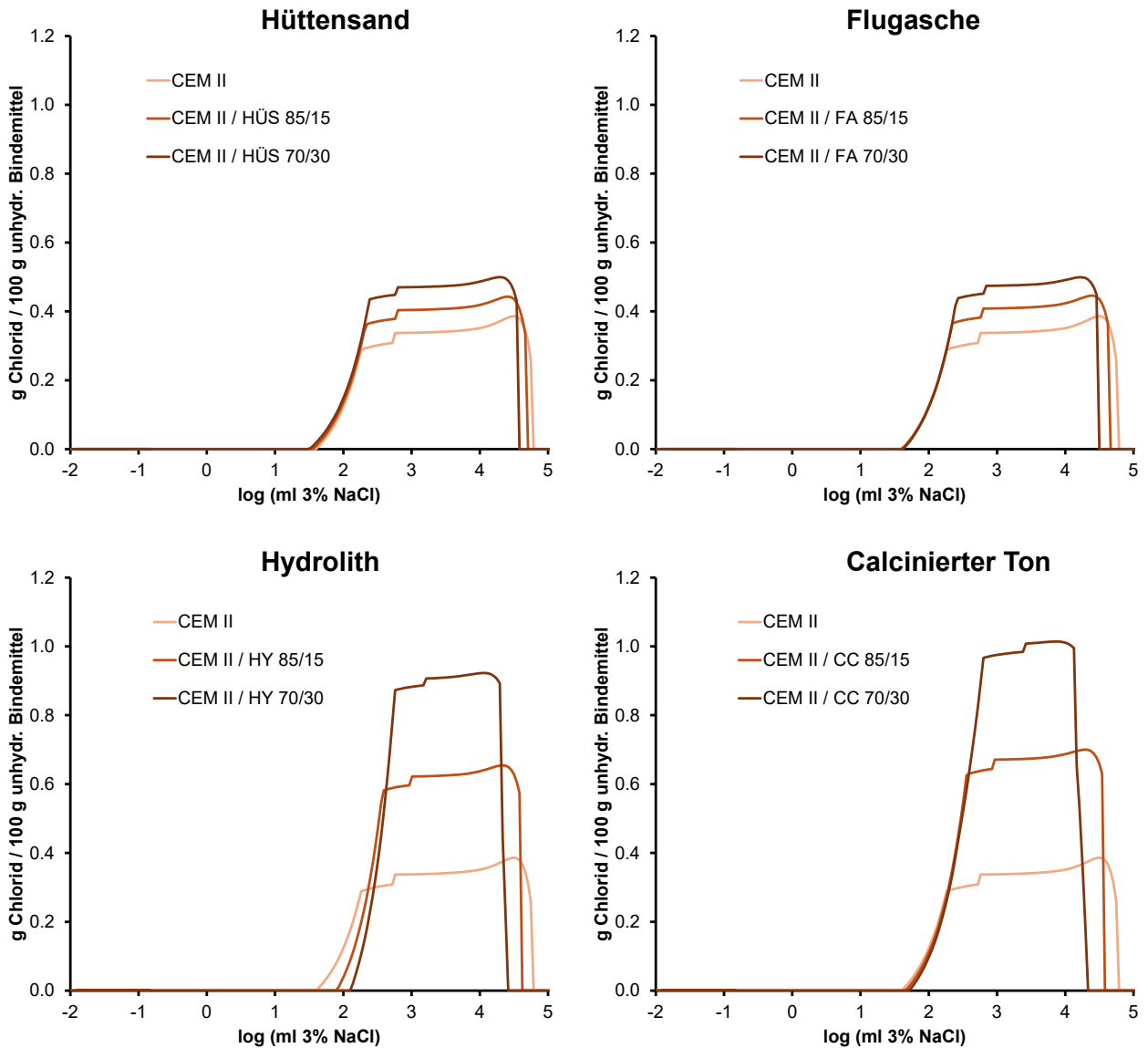


Abb. 12: Chemisch gebundenes Chlorid in Abhängigkeit vom Ersatz des CEM II durch die Zusatzstoffe Hüttensand (links oben), Flugasche (rechts oben), Hydrolith (links unten), calcinierter Ton (rechts unten). Berechnet aus den Daten der thermodynamischen Modellierung.

## 9. Diskussion

Chloride können im passivierten Beton eine Bewehrungskorrosion auslösen. Bei einem passivierten Beton ist die mit Korrosionsprodukten bedeckte Bewehrungsfläche bei der Präsenz von Chloriden zwar deutlich kleiner als beim karbonatisierten Beton, aber es sind im Vergleich zum karbonatisierten Beton 2-3 grössere, lokale Abtragstiefen im Bereich der Korrosionsstellen zu erwarten. Da für die Tragsicherheit die Reduktion des Bewehrungsquerschnittes entscheidend ist,

sind die Auswirkungen der chloridinduzierten Bewehrungskorrosion im nicht-karbonatisierten Beton tendenziell als gravierender einzuschätzen als im karbonatisierten Beton.

Im Rahmen von früheren Untersuchungen an der Empa wurde der Chloridwiderstand von Betonen mit unterschiedlichen Bindemitteln (CEM I, CEM II/A-LL, CEM I mit 20% V, CEM III/A) und variablen w/b-Werten (0.35, 0.45 und 0.60) bestimmt. Wichtigster Unterschied zum aktuellen Projekt war hierbei, dass die Werte für Druckfestigkeit und Chloridwiderstand erst nach einer Nachbehandlungsdauer von 63 Tagen bestimmt wurden. Diese Daten sind in [1] publiziert und in Abb. 13 zusammen mit den aktuellen Daten gegenüber der Druckfestigkeit aufgetragen. Aus den Daten von [1] und den im vorliegenden Projekt erhobenen Daten lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- Bei gleichbleibender Bindemittelzusammensetzung ist der Chloridwiderstand direkt vom w/b-Wert und somit auch von der Druckfestigkeit abhängig. Die Zusammenhänge sind jedoch für jedes Bindemittel resp. jede Bindemittelkombination unterschiedlich. Während bei Zusatzstoffen wie Hüttensand das Einhalten der Mindestfestigkeit für einen C30/37 in allen untersuchten Fällen auch zu einem genügenden Chloridwiderstand führt, muss die Festigkeit bei nicht reaktiven Zusatzstoffen wie z.B. Kalksteinmehl deutlich über dem Mindestwert liegen, damit auch der Chloridwiderstand eingehalten wird.
- Das Einhalten der Grenzwerte für den Mindestzementgehalt und den maximalen w/z-Wert gemäss Tab. NA.6 der SN EN 206 führt bei allen untersuchten Bindemittelkombinationen zu einer genügenden Druckfestigkeit, jedoch in Abhängigkeit des verwendeten Zusatzstoffes nicht zwangsläufig zu einem genügenden Chloridwiderstand. Die anzustrebende Mindestfestigkeit entspricht somit nicht immer der Druckfestigkeitsklasse gemäss Tab. NA.5 der SN EN 206 sondern muss bei Anpassungen des Bindemittelkonzeptes ebenfalls angepasst werden, um den Chloridwiderstandsgrenzwert zu erfüllen (z.B. mittels Reduktion des w/b-Wertes).
- Bei anderen dauerhaftigkeitsrelevanten Eigenschaften wie z.B. der Gasdiffusivität besteht ein allgemeiner, von der Art des Zusatzstoffes weitgehend unabhängiger Zusammenhang zur Druckfestigkeit. Bei der Prüfung des Chloridwiderstandes spielen somit weitere Faktoren eine relevante Rolle wie z.B. Art der Porenverbindungen untereinander (Flaschenhalse, etc.) oder die Art der Prüfung (gesättigter Zustand). Wie in [1] gezeigt wurde, können nämlich die Unterschiede verschiedener Zusatzstoffe in Bezug auf den Chloridwiderstand nicht ausschliesslich mit ihrer aufgrund der chemischen Zusammensetzung zu erwartenden unterschiedlichen Chloridbindekazapazität oder mit einer unterschiedlichen Gesamtporosität erklärt werden. Die Beschleunigung mittels elektrischem Feld im Vergleich mit natürlicher Diffusion liefert ebenfalls keine Erklärung für die Unterschiede.
- Beim ursprünglich für Tiefbaubetone eingesetzten, herkömmlichem Portlandzement CEM I war das Vorhaltemass für die Druckfestigkeit unter Einhaltung der Grenzen für den Mindestzementgehalt und den maximalen w/z-Wert gemäss Tab. NA.6 der SN EN 206 derart gross, dass davon ausgegangen werden konnte, dass auch der Chloridwiderstandsgrenzwert zielsicher erfüllt werden kann. Mit dem zunehmenden Einsatz von Zusatzstoffen ist in Bezug auf den Chloridwiderstand zu beachten, dass dieser je nach Art des Zusatzstoffes und dessen Gehalt bei gleicher Festigkeit abnehmend kann.
- Die faktisch höheren Wassergehalte aufgrund der Berücksichtigung der Kernfeuchte der Gesteinskörnung dürften für die Druckfestigkeit kaum kritisch sein, da das Vorhaltemass in

Bezug auf die Mindestdruckfestigkeit bei allen untersuchten Bindemittelkombinationen relativ gross war. Es kann jedoch erwartet werden, dass in Bezug auf den Chloridwiderstand Betone, welche ohne Abzug der Kernfeuchte noch knapp unter dem Grenzwert liegen, danach über dem Grenzwert liegen können.

- Der spätere Prüfzeitpunkt in [1] führt für ein gegebenes Bindemittel bei gleicher Druckfestigkeit im Vergleich mit den im vorliegenden Bericht durchgeführten Versuchen meistens zu einem geringeren  $D_{Cl}$ . Dies gilt insbesondere für die Flugasche und den Hüttensand, jedoch nicht für das nicht reaktive Kalksteinmehl. Der zunehmende Hydratationsgrad des Zusatzstoffes dürfte sich somit auf die Druckfestigkeit und den Chloridwiderstand unterschiedlich auswirken. Die Reaktionskinetik der Zusatzstoffe (Malfeinheit, chemische Zusammensetzung, etc.) ist somit ein wichtiger Einflussparameter für den gemessenen Chloridwiderstand im Alter von 28 Tagen. Es kann z.B. sein, dass insbesondere beim verwendeten Glasmehl eine höhere Malfeinheit zu einer erhöhten Reaktivität und somit zu einem deutlicheren Einfluss auf den Chloridwiderstand geführt hätte.
- Aufgrund der unterschiedlichen Reaktionskinetik wirkt sich auch der Gehalt der verschiedenen Zusatzstoffe unterschiedlich auf den Chloridwiderstand aus. Bei einer Prüfung im Alter von 28 Tagen scheint es unterschiedliche Optima für den Gehalt an Zusatzstoffen zu geben. Bei dem verwendeten Hüttensand und der Flugasche hat sich der höhere Gehalt negativ auf den Chloridwiderstand ausgewirkt, da der Hydratationsgrad der Zusatzstoffe mit zunehmender Dosierung abnimmt [29]. Die besseren Werte des Hüttensandes gegenüber der Flugasche sind auf die im Vergleich etwas schnellere Hydratation des Hüttensandes und vor allem auf die besser porenfüllenden Hydratationsprodukte des Hüttensandes zurückzuführen [29-31]. Weil beim calcinierten Ton die Hydratationskinetik wesentlich schneller ist als bei der Flugasche und dem Hüttensand [32], nimmt der Chloridwiderstand mit zunehmender Dosierung zu. Beim Hydrolith war kein relevanter Einfluss des Gehalts erkennbar, was auf eine mittlere Reaktivität bezogen auf die anderen Zusatzstoffe hinweist.
- Die SCC-Betone aus [1] mit einem deutlich höheren Bindemittelleimvolumen weisen bei gleicher Druckfestigkeit einen vergleichbaren  $D_{Cl}$  auf wie die zugehörigen Normalbetone mit dem gleichen Bindemittel. Das Bindemittelleimvolumen scheint somit keinen Einfluss auf den gemessenen Chloridwiderstand zu haben. Dies ist nachvollziehbar, da bei der Chloridwiderstandsprüfung nicht die Menge an eingedrungenen Chloriden entscheidend ist, sondern die erreichte Eindringtiefe. Wenn das Porensystem (Porengrossenverteilung, Porenverbindungen, etc.) pro Volumeneinheit Zementstein sowie die chemische Bindekapazität gleichbleiben und zusätzlich auf der Aussenseite ein unendliches Reservoir an Chloriden vorhanden ist (wie bei der Chloridwiderstandsprüfung), ist die Eindringtiefe von der Zementsteinmenge unabhängig.
- Aus dem gleichen Grund hat die Reduktion des Mindestzementgehaltes der Sorte G von  $340 \text{ kg/m}^3$  auf  $320 \text{ kg/m}^3$  keinen Einfluss auf den Chloridwiderstand, falls der w/b-Wert identisch bleibt.
- Eine optimierte Sandsieblinie führt im Vergleich mit einer Sandsieblinie mit Katzenbuckel nicht zu einer Verbesserung des Chloridwiderstandes. Erst wenn aufgrund der optimierten Sandsieblinie der w/b-Wert bei gleichbleibendem Bindemittelgehalt und Fliessmittelgehalt reduziert werden kann, ergibt sich eine Verbesserung des Chloridwiderstandes, welche auch wirtschaftliche Vorteile mit sich bringt. Eine Optimierung der Sandsieblinie mittels Sandklassierer führt üblicherweise auch zu geringeren Schwankungen in der Betonproduktion und somit auch zu einem konstanteren Chloridwiderstand. Die Reduktion des

Bindemittelgehaltes aufgrund einer optimierten Sandsieblinie mit geringerem Hohlraumgehalt (bei sonst gleicher Festigkeit) dürfte den Chloridwiderstand kaum beeinflussen. Dies deshalb, weil bei der Chloridwiderstandsprüfung nicht die Menge an eingedrungenen Chloriden eine Rolle spielt, sondern die erreichte Eindringtiefe. Unter Annahme einer gleichbleibenden Porencharakteristik (Porengrößenverteilung und -konnektivität) ist die Eindringtiefe unabhängig von Zementsteinvolumen.

Wie die thermodynamischen Modellierungen zeigen, erfolgt die chemische Chloridbindung aufgrund einer Reaktion von Monocarbonat mit dem Chlorid zur stabilen Phase Friedels Salz. Hierbei spielt das in Bindemittelsystem vorhandene reaktive Aluminium eine massgebliche Rolle. Zusatzstoffe stellen reaktives Aluminium zur Verfügung, vor allem mit Hydrolith und calciniertem Ton bildet sich mehr Monocarbonat, welches mit dem Chlorid zu Friedels Salz reagiert. Wie oben erklärt, ist die Kapazität zur chemischen Chloridbindung aber nicht der massgebende Einflussfaktor auf den Chloridmigrationskoeffizienten, vielmehr ist der Einfluss der Zusatzstoffe auf die Porosität des Betons der entscheidende Faktor [1].

Da das Verhältnis Alit/Belit im Wesentlichen durch das Verhältnis  $\text{CaO/SiO}_2$  im Klinker beeinflusst wird, ist hier kein massgeblicher Einfluss auf die chemische Chloridbindung oder den Chloridwiderstand zu erwarten. Da aber Alit rascher reagiert als Belit, d.h. der Hydratationsgrad nach 28 Tagen ist höher, hat ein Alit-reicherer Zement ein dichteres und weniger permeables Porengefüge im Vergleich zu einem Belit-reicheren Zement. Ein höherer Reaktionsgrad nach 28 Tagen lässt sich jedoch einfacher mit einer feineren Mahlung des Zementes erreichen.

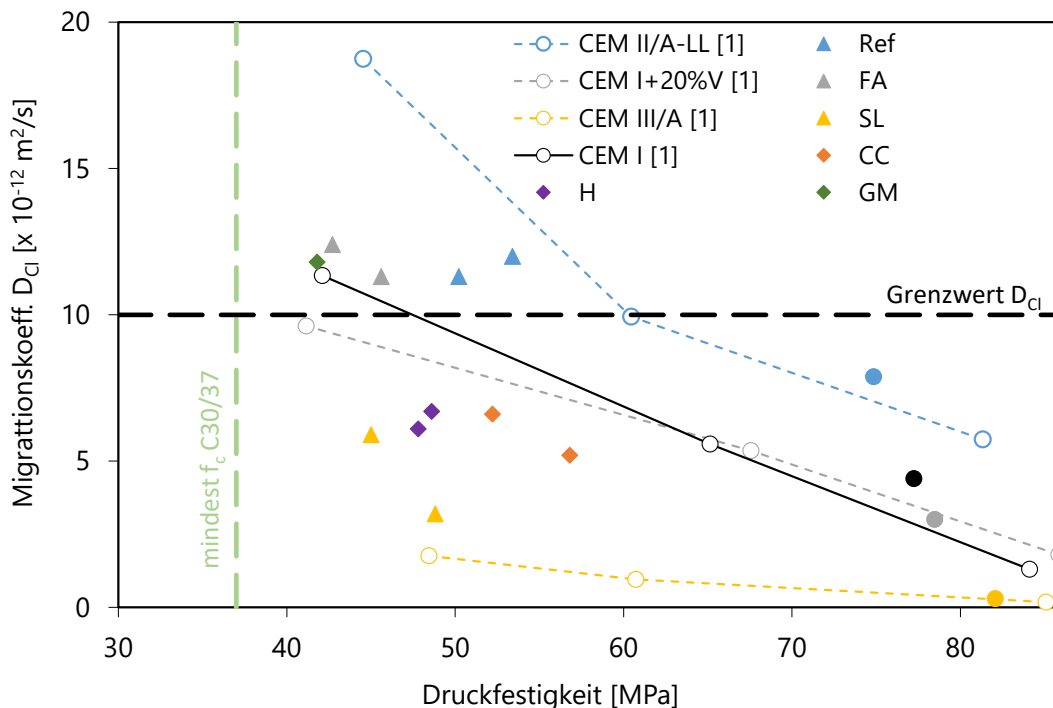


Abb. 13: Chloridmigrationskoeffizient  $D_{Cl}$  in Abhängigkeit der Druckfestigkeit. Betone mit unterschiedlichen Zusatzstoffen aus dem aktuellen Projekt gemäss Tab. 3 zusammen mit Daten aus [1]. Leere Kreissymbole = Normalbetone aus [1], ausgefüllte Kreissymbole = SCC-Betone aus [1],

Dreiecks- und Quadratsymbole = Resultate aktuelles Projekt. Nachbehandlungsdauer der Betone aus [1] = 63d, aktuelles Projekt = 28d.

## 10. Problempunkte / Erkenntnisse für die Praxis

Eine massgebende Voraussetzung, um Probleme beim Chloridwiderstand zu vermeiden oder lösen zu können, ist die Erkenntnis, dass mit der Abkehr vom CEM I weder die Mindestzementmenge, noch das Einhalten des maximalen w/z und der geforderten Druckfestigkeitsklasse eine Garantie dafür bieten, den Grenzwert des Chloridmigrationskoeffizienten zu erreichen.

Treten in einem Betonwerk Probleme beim Erreichen des Chloridwiderstandes auf, sind bei den Massnahmen die in Kapitel 9 erläuterten Zusammenhänge zu berücksichtigen. Vereinfacht dargestellt umfassen die Einfluss- respektive Steuergrössen den w/z oder w/b, die Zusatz- oder Zumahlstoffe inklusive deren Dosierung und die Sandsieblinie. Wie stark diese Einflussgrössen den Chloridmigrationskoeffizienten verändern können, ist schematisch in Abb. 14 dargestellt. Da sich eine Erhöhung des Chloridgehaltes im Klinker nicht auf den Chloridwiderstand auswirkt, wurde er in der Darstellung nicht berücksichtigt. Beim Vergleich der Einflussgrössen wird deutlich, dass die Optimierung der Sandsieblinie nur kleine Veränderungen bewirken kann, die sich in einem Betonwerk im Bereich der Streuung bewegen dürften. Die Verwendung eines Sandklassierer kann aber eine wichtige Massnahme sein, um Streuungen der Betonqualität zu minimieren. Hingegen sind der w/z und die Wahl der Art und Menge des verwendeten Zumahl- oder Zusatzstoffes effiziente Einflussgrössen, um den Chloridmigrationskoeffizienten zu steuern. Wie diese beiden dominanten Einflussgrössen eingesetzt werden, um den Chloridwiderstand zielsicher zu erreichen, ist von der vorhandenen Anlagentechnik im Betonwerk und den verfügbaren Zementen respektive Zusatzstoffen abhängig.

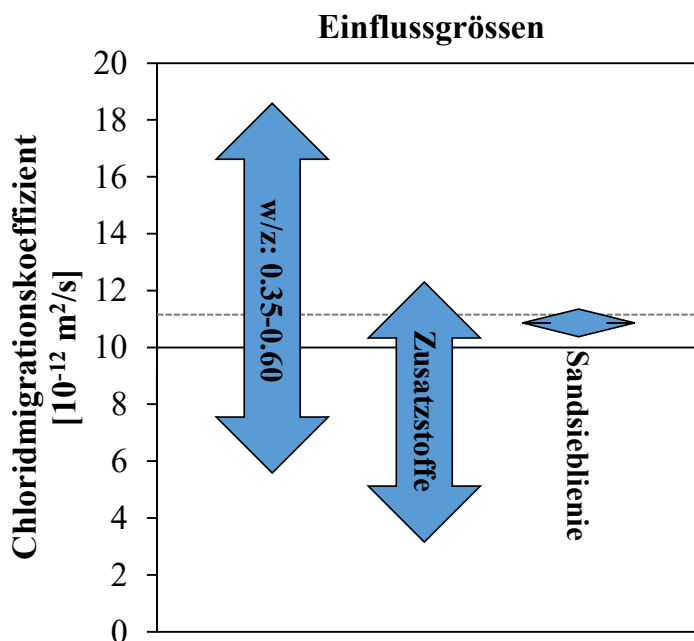


Abb. 14: Einflussgrössen auf den Chloridmigrationskoeffizienten bezogen auf den Grenzwert (durchgezogene Linie) und den Referenzbeton aus CEM II/A-LL (gestrichelte Linie). Daten für "w/z" bei Beton aus CEM II/A-LL aus [1], für "Zusatzstoffe" (bei konstantem w/b) und die "Sandsieblinie" aus dem aktuellen Projekt (Tabelle 5).

## 11. Literatur

- [1] R. Loser, B. Lothenbach, A. Leemann, M. Tuchschnid, Chloride resistance of concrete and its binding capacity – Comparison between experimental results and thermodynamic modeling, *Cement and Concrete Composites*, 32 (2010) 34-42.
- [2] C.D. Lawrence, Transport of oxygen through concrete, in: F.P. Glasser (Ed.) *Concrete Society, Meeting on Chemistry and Chemically-Related Properties of Cement* Imperial College, London, 1984, pp. 277-293.
- [3] N.R. Buenfeld, E. Okundi, Effect of cement content on transport in concrete, *Magazine of Concrete Research*, 50 (1998) 339-351.
- [4] C. Villani, R. Loser, M.J. West, C. Di Bella, P. Lura, W.J. Weiss, An inter lab comparison of gas transport testing procedures: Oxygen permeability and oxygen diffusivity, *Cement and Concrete Composites*, 53 (2014) 357-366.
- [5] R. Snellings, X-ray powder diffraction applied to cement, in: K. Scrivener, R. Snellings, B. Lothenbach (Eds.) *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*, CRC Press, Boca Raton (FL, USA), London (UK) and New York (NY, USA), 2016, pp. 107-176.
- [6] B.H. O'Connor, M.D. Raven, Application of the Rietveld refinement procedure in assaying powdered mixtures, *Powd. Diffr.*, 3 (1988) 2-6.
- [7] D. Jansen, C. Stabler, F. Götz-Neunhoeffler, S. Dittrich, J. Neubauer, Does Ordinary Portland Cement contain amorphous phase? A quantitative study using an external standard method, *Powd. Diffr.*, 26 (2011) 31-38.
- [8] T. Wagner, D.A. Kulik, F.F. Hingerl, S.V. Dmytrieva, GEM-Selektor geochemical modelling package: TSolMod Library and data interface for multicomponent phase models, *Can. Mineral.*, 50 (2012) 1173-1195.
- [9] D.A. Kulik, T. Wagner, S.V. Dmytrieva, G. Kosakowski, F.F. Hingerl, K.V. Chudnenko, U.R. Berner, GEM-Selektor geochemical modeling package: revised algorithm and GEMS3K numerical kernel for coupled simulation codes, *Computational Geosciences*, 17 (2013) 1-24.
- [10] W. Hummel, U. Berner, E. Curti, F.J. Pearson, T. Thoenen, Nagra/PSI chemical thermodynamic data base 01/01, *Radiochim. Acta*, 90 (2002) 805-813.
- [11] B. Lothenbach, D.A. Kulik, T. Matschei, M. Balonis, L. Baquerizo, B. Dilnesa, G.D. Miron, R.J. Myers, Cemdata 18: A chemical thermodynamic database for hydrated Portland cements and alkali-activated materials, *Cem. Concr. Res.*, 115 (2019) 472-506.
- [12] D.A. Kulik, Improving the structural consistency of C-S-H solid solution thermodynamic models, *Cement and Concrete Research*, 41 (2011) 477-495.
- [13] B.Z. Dilnesa, E. Wieland, B. Lothenbach, R. Dähn, K. Scrivener, Fe-containing phases in hydrated cements, *Cem. Concr. Res.*, 58 (2014) 45-55.
- [14] K. De Weerd, Chloride binding in concrete: recent investigations and recognised knowledge gaps: RILEM Robert L'Hermite Medal Paper 2021, *Mater. Struct.*, 54 (2021) 214.
- [15] B. Lothenbach, G. Le Saout, E. Gallucci, K. Scrivener, Influence of limestone on the hydration of Portland cements, *Cem. Concr. Res.*, 38 (2008) 848-860.
- [16] H.F.W. Taylor, Modification of the Bogue calculation, *Adv. Cem. Res.*, 2 (1989) 73-77.
- [17] P.T. Durdzinski, M. Ben Haha, S.A. Bernal, N. De Belie, E. Gruyaert, B. Lothenbach, E.M. Mendez, J.L. Provis, A. Scholer, C. Stabler, Z.J. Tan, Y.V. Zaccardi, A. Vollpracht, F. Winnefeld, M. Zajac, K.L. Scrivener, Outcomes of the RILEM round robin on degree of reaction of slag and fly ash in blended cements, *Mater. Struct.*, 50 (2017).
- [18] F. Zunino, Y. Dhandapani, M. Ben Haha, J. Skibsted, S. Joseph, S. Krishnan, A. Parashar, M.C.G. Juenger, T. Hanein, S.A. Bernal, K.L. Scrivener, F. Avet, Hydration and mixture design of calcined clay blended cements: review by the RILEM TC 282-CCL, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 55 (2022).
- [19] K. De Weerd, B. Lothenbach, M.R. Geiker, Comparing chloride ingress from seawater and NaCl solution in Portland cement mortar, *Cem. Concr. Res.*, 115 (2019) 80-89.

- [20] Y. Zhou, B. Gencturk, K. Willam, A. Attar, Carbonation-induced and chloride-induced corrosion in reinforced concrete structures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27 (2015) 04014245.
- [21] W.K. Green, Steel reinforcement corrosion in concrete – an overview of some fundamentals, *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 55 (2020) 289-302.
- [22] A. Leemann, P. Nygaard, J. Kaufmann, R. Loser, Relation between carbonation resistance, mix design and exposure of mortar and concrete, *Cement and Concrete Composites*, 62 (2015) 33-43.
- [23] A.S. Al-Ameeri, M.I. Rafiq, O. Tsioulou, Combined impact of carbonation and crack width on the Chloride Penetration and Corrosion Resistance of Concrete Structures, *Cement and Concrete Composites*, 115 (2021) 103819.
- [24] M. Hren, V. Bokan Bosiljkov, A. Legat, Effects of blended cements and carbonation on chloride-induced corrosion propagation, *Cement and Concrete Research*, 145 (2021) 106458.
- [25] U. Angst, B. Elsener, C.K. Larsen, Ø. Vennesland, Critical chloride content in reinforced concrete — A review, *Cement and Concrete Research*, 39 (2009) 1122-1138.
- [26] Y. Cao, C. Gehlen, U. Angst, L. Wang, Z. Wang, Y. Yao, Critical chloride content in reinforced concrete — An updated review considering Chinese experience, *Cement and Concrete Research*, 117 (2019) 58-68.
- [27] F. Hunkeler, M. Ungricht, H. Ungricht, *Vergleichende Untersuchungen zum Chloridwiderstand von Betonen*, 2002.
- [28] F. Jacobs, A. Leemann, *Betoneigenschaften nach SN EN 206-1*, 2007.
- [29] E. Berodier, K. Scrivener, Evolution of pore structure in blended systems, *Cement and Concrete Research*, 73 (2015) 25-35.
- [30] X. Feng, E.J. Garboczi, D.P. Bentz, P.E. Stutzman, T.O. Mason, Estimation of the degree of hydration of blended cement pastes by a scanning electron microscope point-counting procedure, *Cement and Concrete Research*, 34 (2004) 1787-1793.
- [31] B. Lothenbach, K. Scrivener, R. Hooton, Supplementary cementitious materials, *Cement and concrete research*, 41 (2011) 1244-1256.
- [32] M. Bagheri, B. Lothenbach, K. Scrivener, The effect of paste composition, aggregate mineralogy and temperature on the pore solution composition and the extent of ASR expansion, *Materials and Structures*, 55 (2022) 192.

## Anhang

Phase <sup>1)</sup>	CEM II M.-%	Hüttensand M.-%	Flugasche M.-%	Hydrolith M.-%	Calc. Ton M.-%
Alit (C <sub>3</sub> S)	54.5		7.5		
Belit (C <sub>2</sub> S)	8.4		0.9		
Aluminat kubisch (C <sub>3</sub> A)	2.3		0.1		
Aluminat orthorh. (C <sub>3</sub> A)	2.7		0.4		
Ferrat (C <sub>4</sub> AF)	7.4		0.3		
Portlandit	0.5				
Periklas	0.3		0.2		
Anhydrit			0.4		1.6
Gips	5.6		0.7		
Arcanit	0.8				
Aphthitalit	0.4				
Calcit	16.4	0.2	1.2	5.3	0.8
Quarz	0.7	0.5	6.5		18.2
Merwinit		0.2			
Mellilit		0.2			
Mullit			4.7		
Hematit			0.7		0.6
Magnetit			1.3		
Natrolit				24.9	
Gonnardit				3.1	
Thomsonit				3.3	
Sanidin				43.6	
Plagioclas				3.4	
Pseudowollastonit				1.6	
Parawollastonit				3.4	
Augit				10.6	
Andradit				0.9	
Muskovit					1.7
Anorthit					4.2
Mikroklin					2.3
Amorph/andere	n.b. <sup>2)</sup>	98.8	75.1	n.b. <sup>2)</sup>	70.6

<sup>1)</sup> Einkristallstrukturen der Zementphasen entnommen aus [5], zusätzliche Strukturen aus der ICSD-Datenbank (<https://icsd.fiz-karlsruhe.de/>)

<sup>2)</sup> nicht bestimmt

Tabelle A1: Mineralogische Phasenzusammensetzung der untersuchten Bindemittelkomponenten (quantitative Röntgenbeugung).

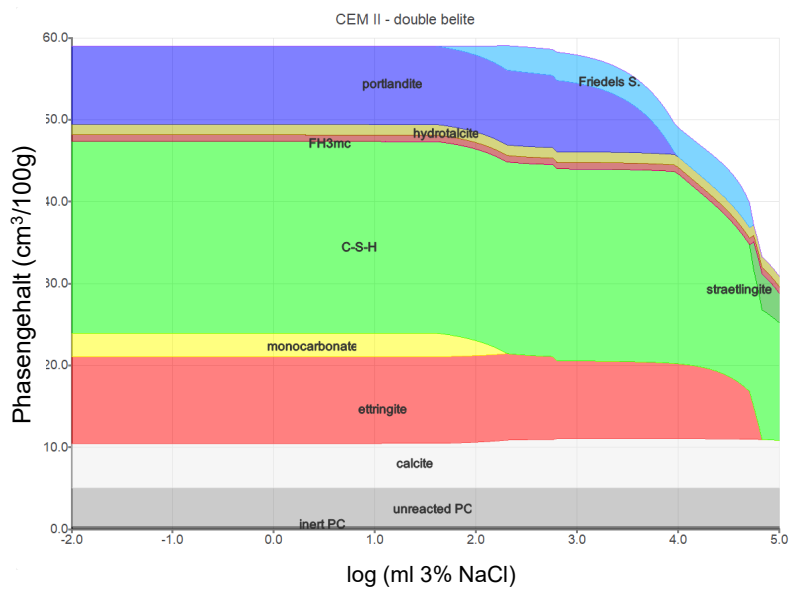
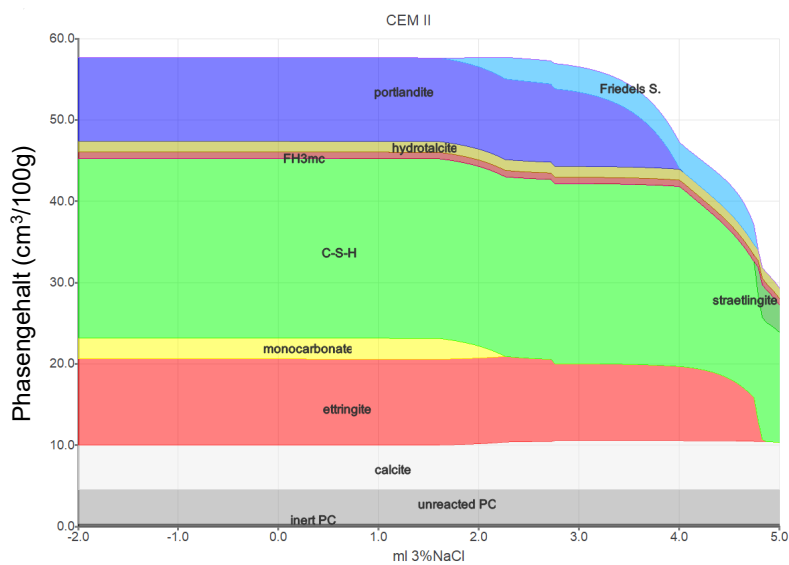
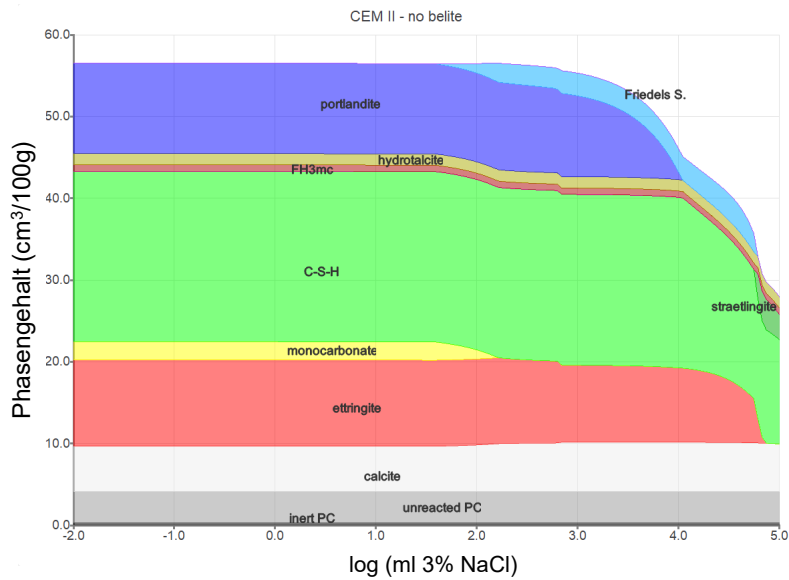


Abb. A1: Berechnete Phasenzusammensetzung des hydratisierten CEM II unter Einwirkung einer zunehmenden Menge 3%-iger NaCl-Lösung. Einfluss des Alit/Belit-Verhältnisses. Oben: kein Belit, Mitte CEM II (Referenz), unten: doppelter Belitgehalt im Vergleich zum CEM II.

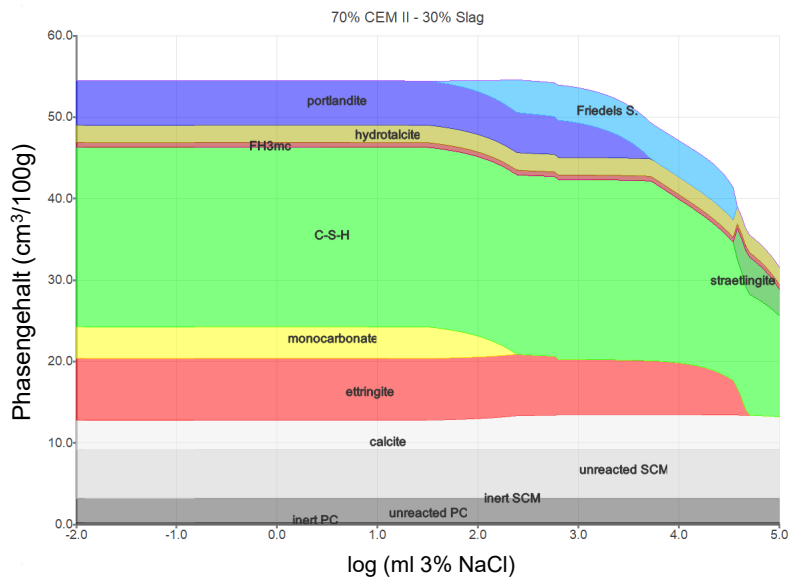
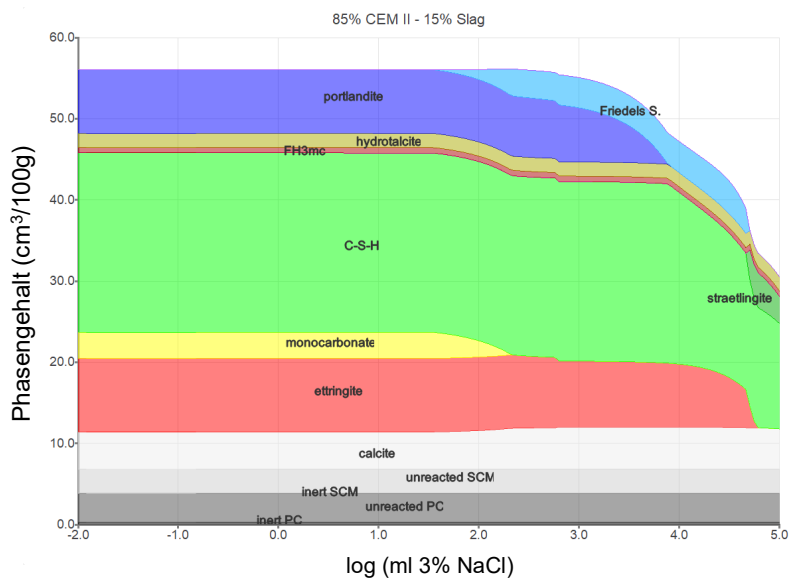
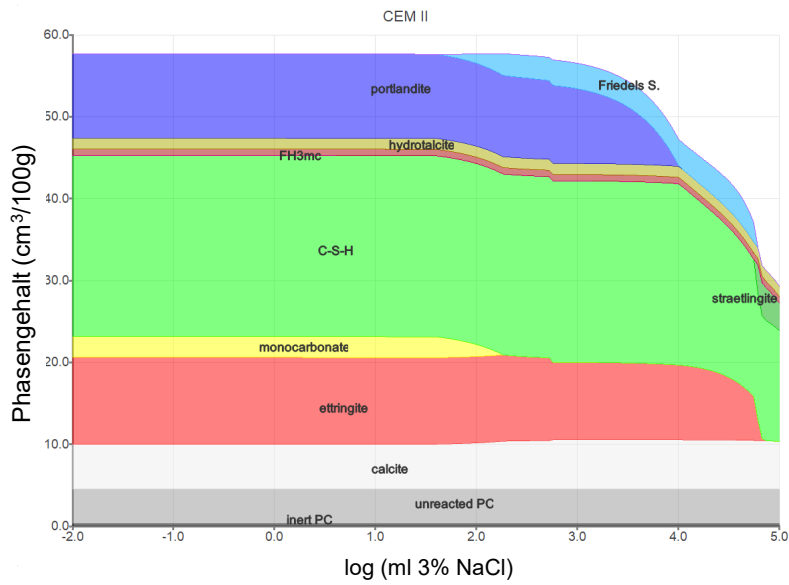


Abb. A2: Berechnete Phasenzusammensetzung des hydratisierten CEM II unter Einwirkung einer zunehmenden Menge 3%-iger NaCl-Lösung. Einfluss Ersatz Zement durch Hüttensand. Oben: CEM II (Referenz), Mitte: Ersatz 15% Zement durch Hüttensand, unten: Ersatz 30% Zement durch Hüttensand.

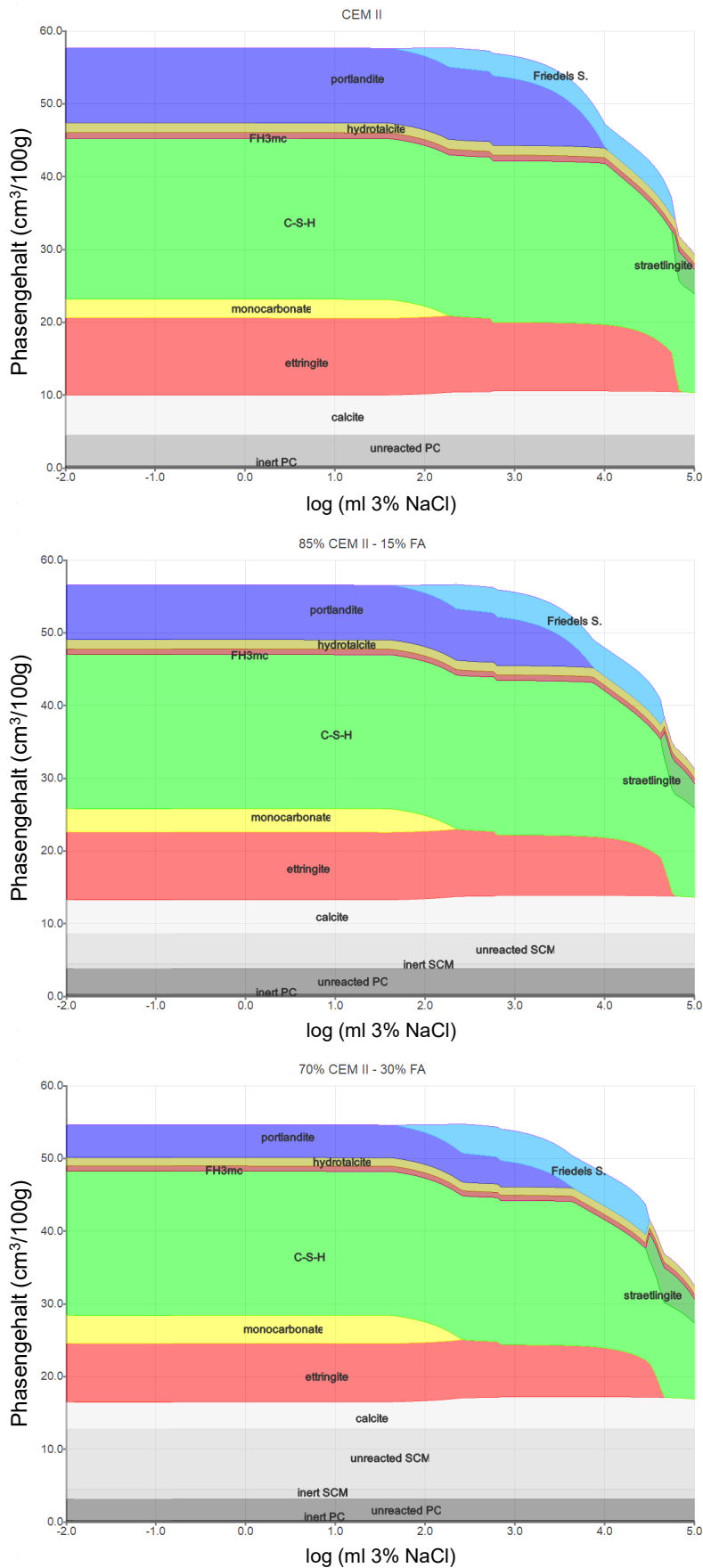


Abb. A3: Berechnete Phasenzusammensetzung des hydratisierten CEM II unter Einwirkung einer zunehmenden Menge 3%-iger NaCl-Lösung. Einfluss Ersatz Zement durch Flugasche. Oben: CEM II (Referenz), Mitte: Ersatz 15% Zement durch Flugasche, unten: Ersatz 30% Zement durch Flugasche.

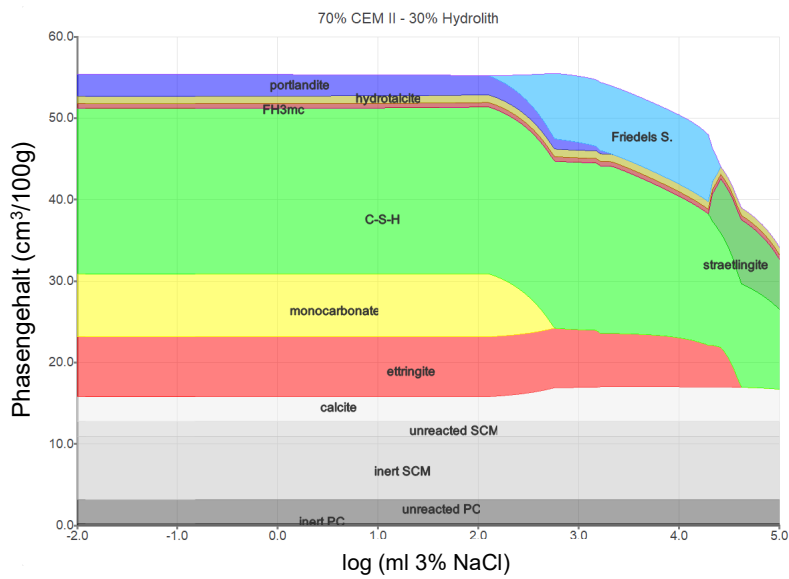
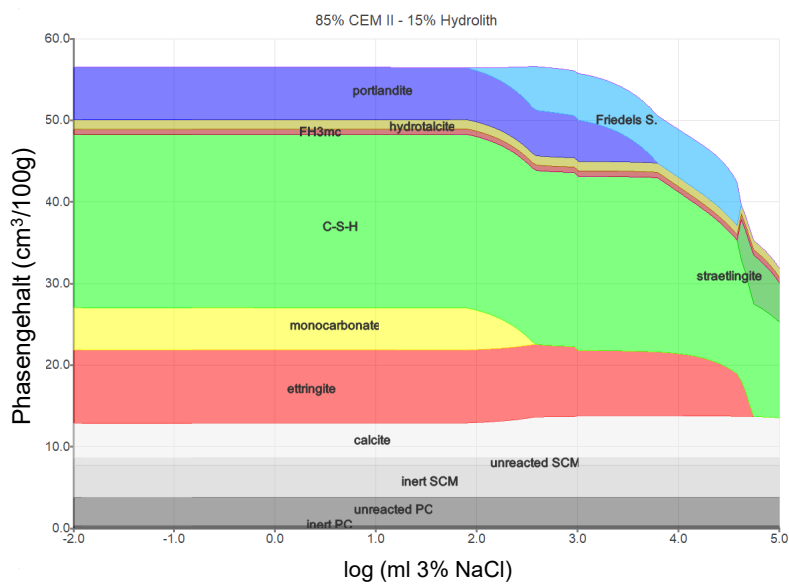
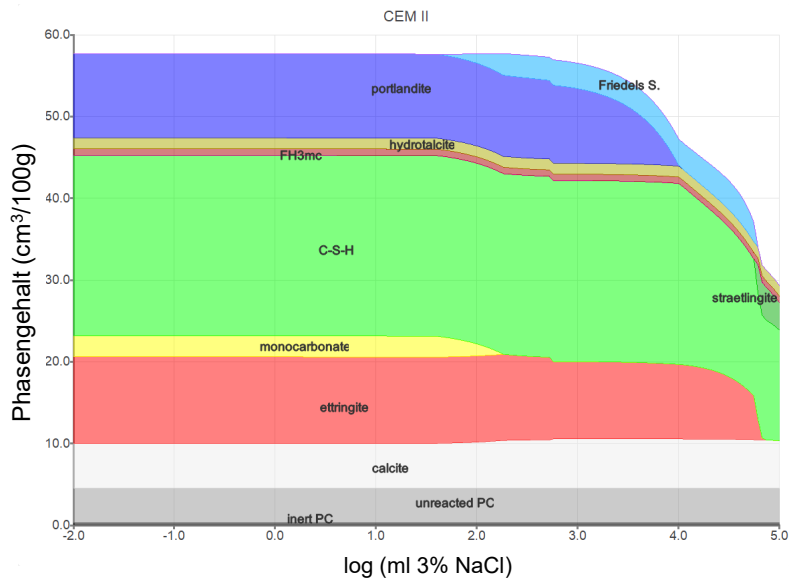


Abb. A4: Berechnete Phasenzusammensetzung des hydratisierten CEM II unter Einwirkung einer zunehmenden Menge 3%-iger NaCl-Lösung. Einfluss Ersatz Zement durch Hydrolith. Oben: CEM II (Referenz), Mitte: Ersatz 15% Zement durch Hydrolith, unten: Ersatz 30% Zement durch Hydrolith.

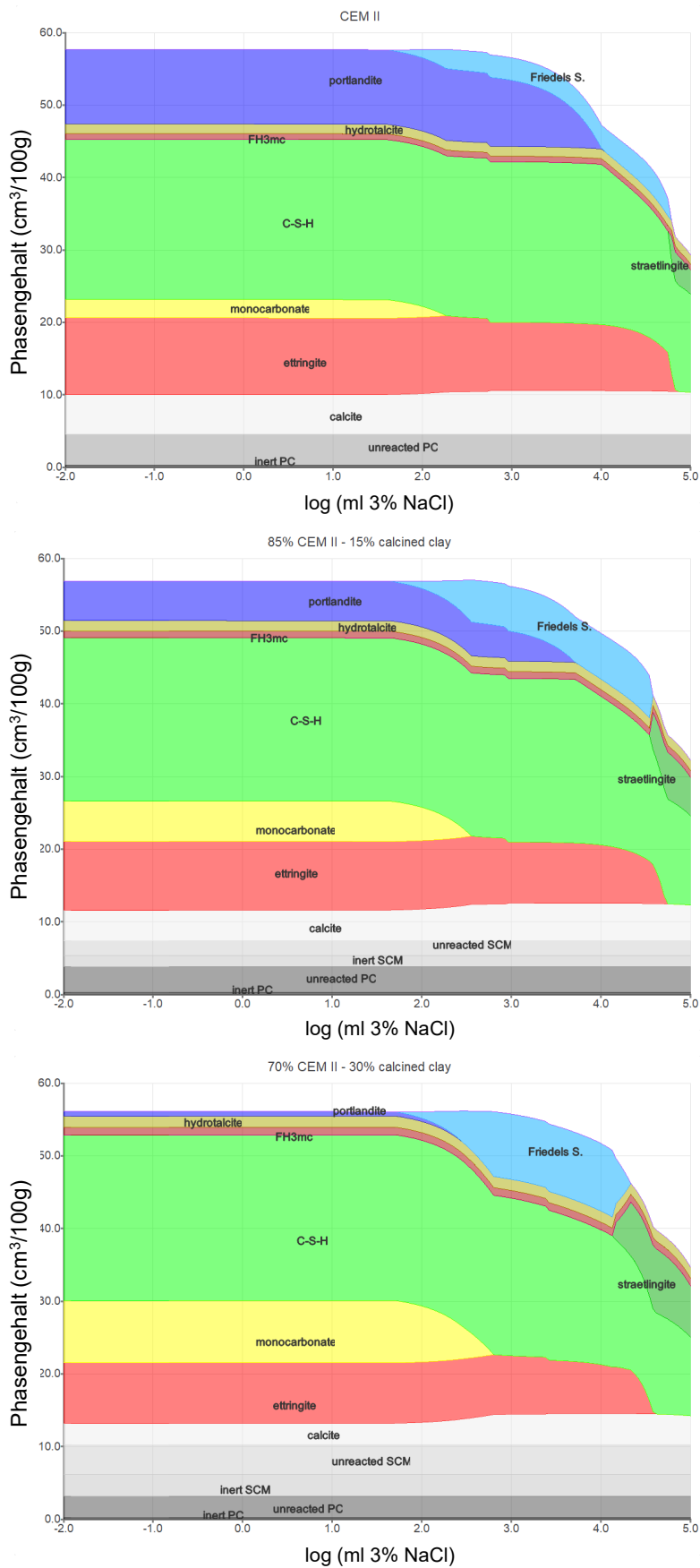


Abb. A5: Berechnete Phasenzusammensetzung des hydratisierten CEM II unter Einwirkung einer zunehmenden Menge 3%-iger NaCl-Lösung. Einfluss Ersatz Zement durch calcinierten Ton. Oben: CEM II (Referenz), Mitte: Ersatz 15% Zement durch calcinierten Ton, unten: Ersatz 30% Zement durch calcinierten Ton.